

Corso di Microzonazione Sismica e Valutazione della Risposta Sismica Locale per la Ricostruzione Post-Terremoto

Università degli Studi de L'Aquila, Auditorium Reiss Romoli
Coppito (AQ), 21-22 Febbraio 2012

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI E MODELLAZIONE NUMERICA

Prof. Ing. Giuseppe Lanzo

*Docente di Geotecnica
Sapienza Università degli Studi di Roma
Facoltà di Architettura
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
e.mail: giuseppe.lanzo@uniroma1.it
Recapiti telefonici: 06- 49919173*



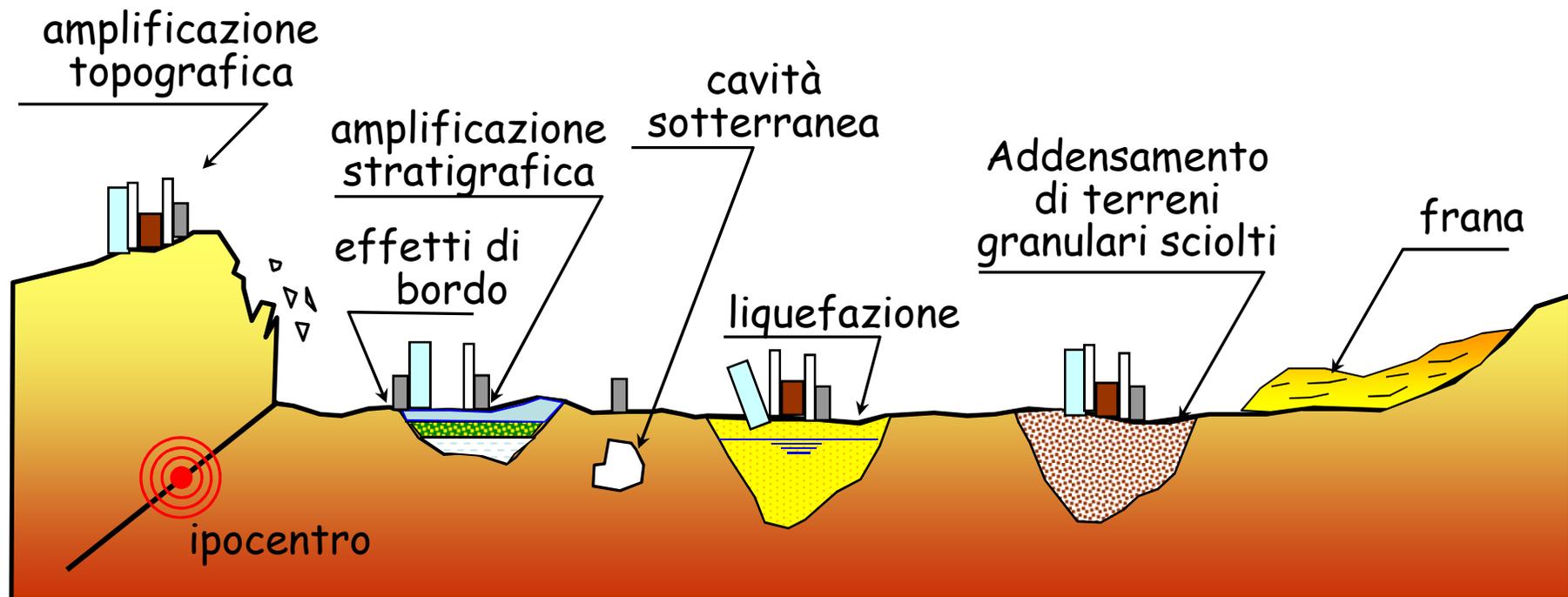
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Indice

- Posizione del problema ed evidenze sperimentali
- Risposta Sismica Locale mono-dimensionale (1D): fisica del problema e principali fattori geotecnici influenti
- Risposta sismica locale bi-dimensionale (2D): fisica del problema e fattori influenti

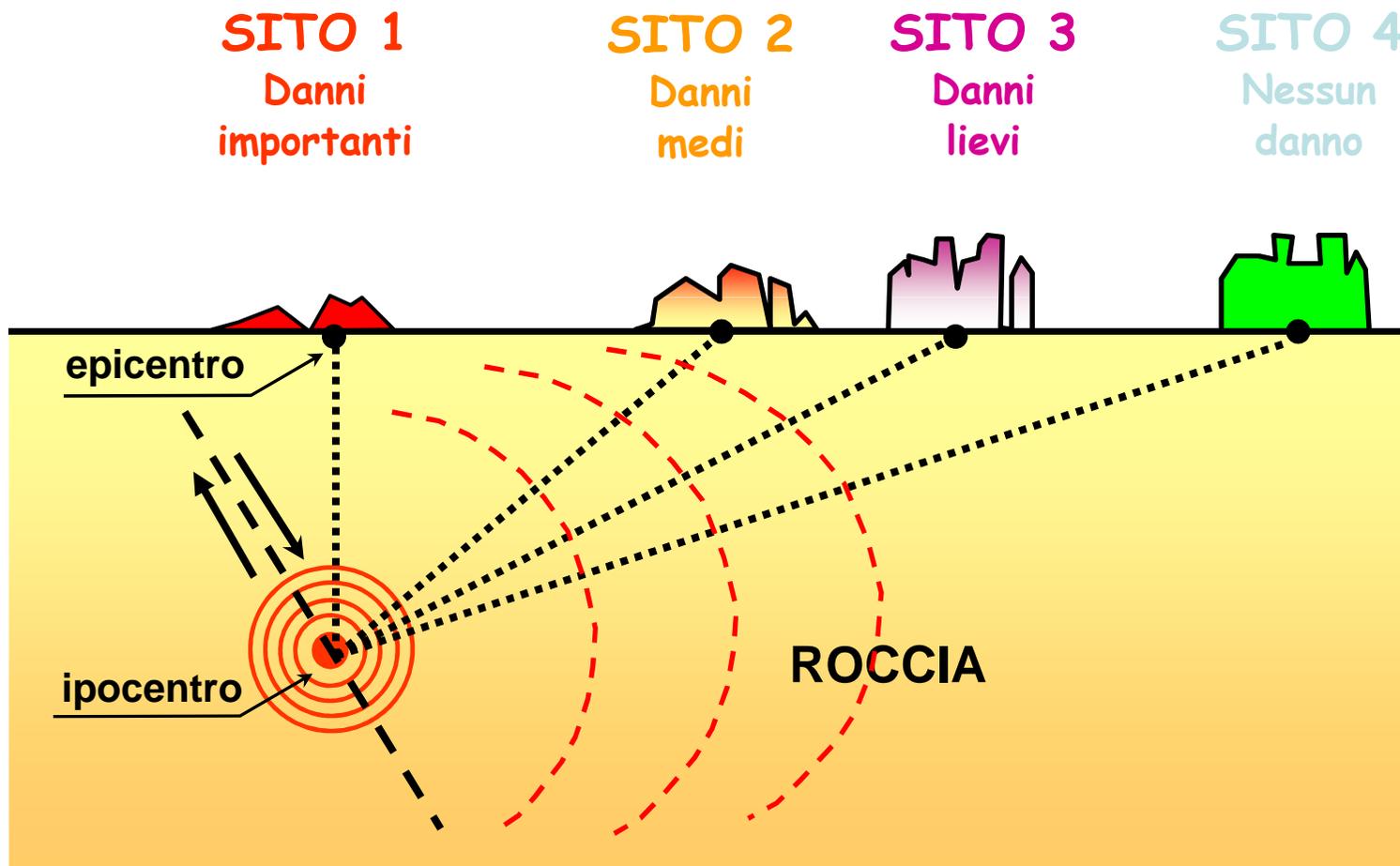
Scenari di pericolosità sismica locale

- risposta sismica locale
- liquefazione
- instabilità dei pendii
- addensamento di terreni granulari sciolti
- crolli di cavità sotterranee



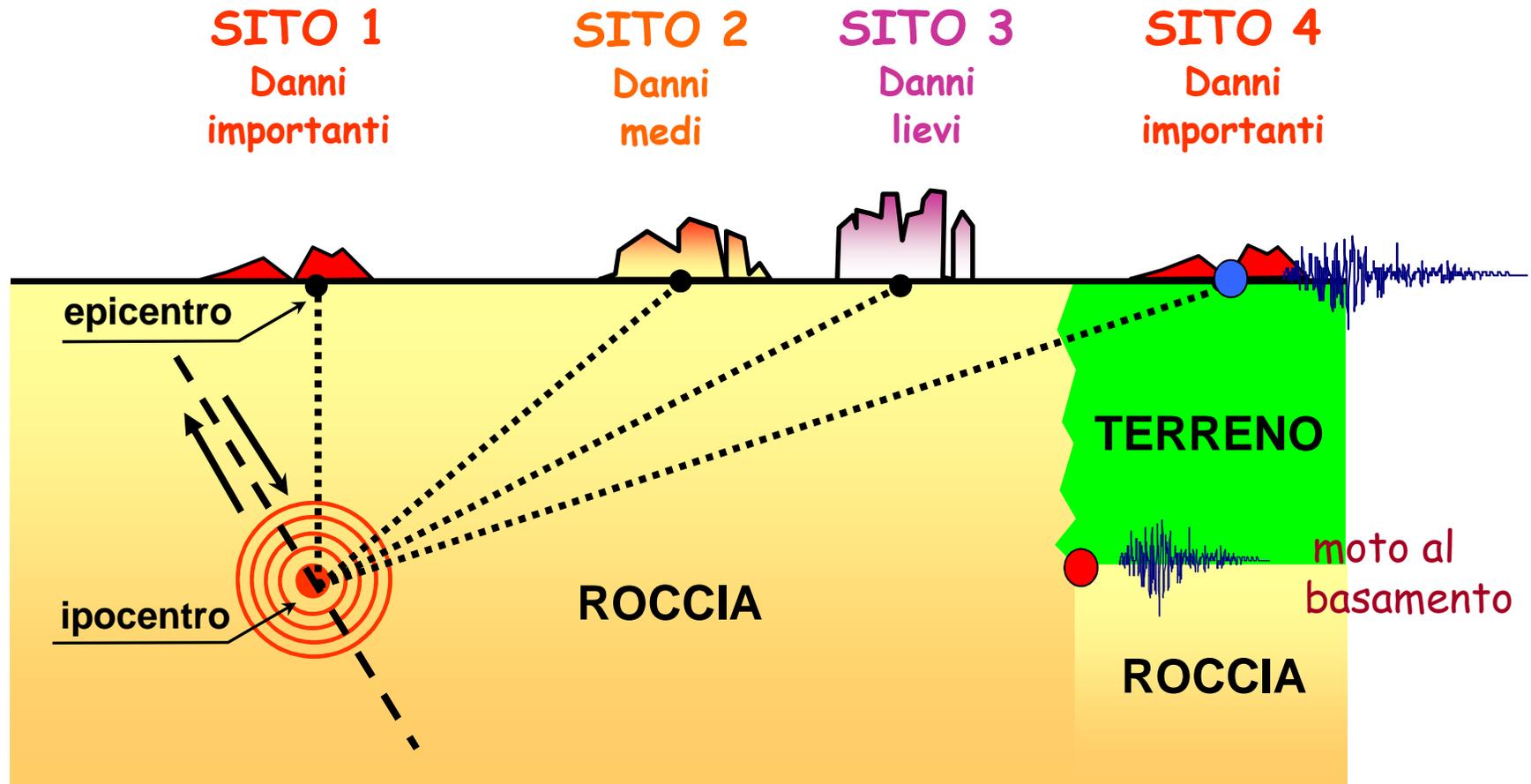
Risposta sismica locale

Sottosuolo rigido (roccia) con piano campagna orizzontale



Risposta sismica locale

Sottosuolo generico con piano campagna orizzontale



Risposta sismica locale

Condizioni locali

caratteristiche morfologiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi superficiali e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono

Risposta Sismica Locale

insieme delle modifiche che il moto sismico di ingresso al sito subisce, in termini di:

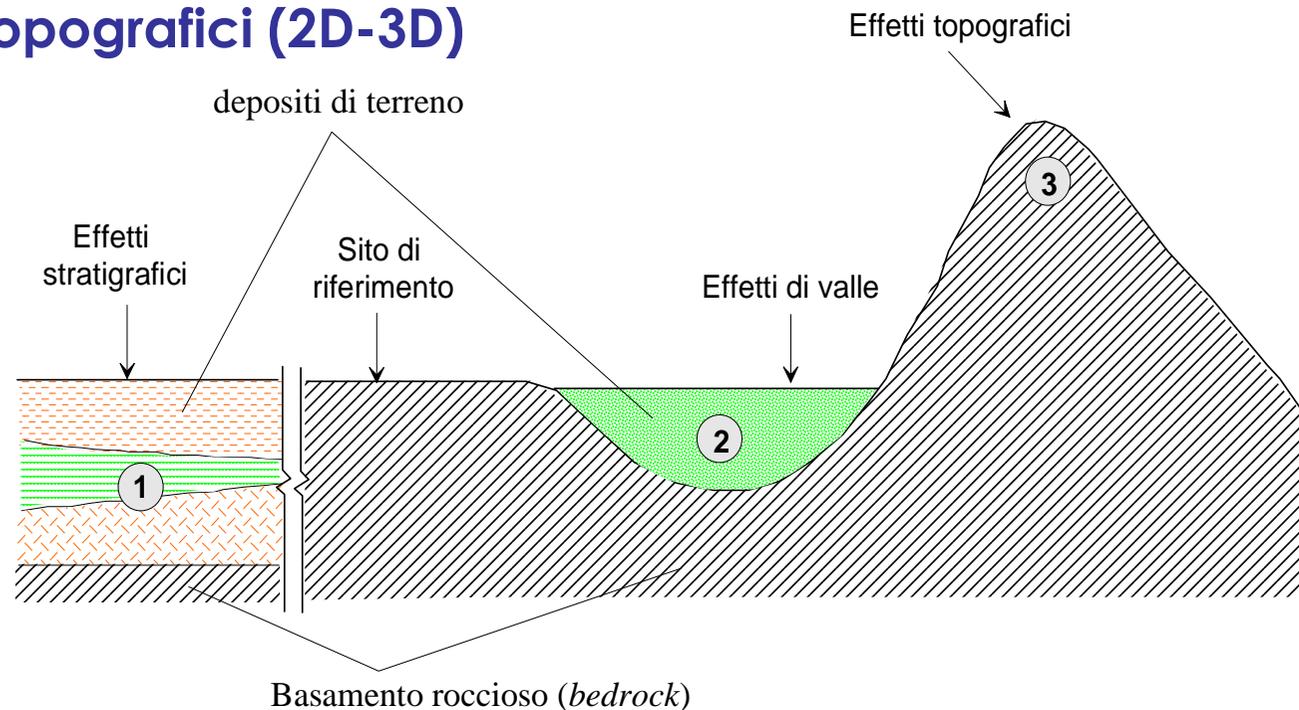
- **ampiezza**
- **contenuto in frequenza**
- **durata**

dovute alle condizioni locali

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

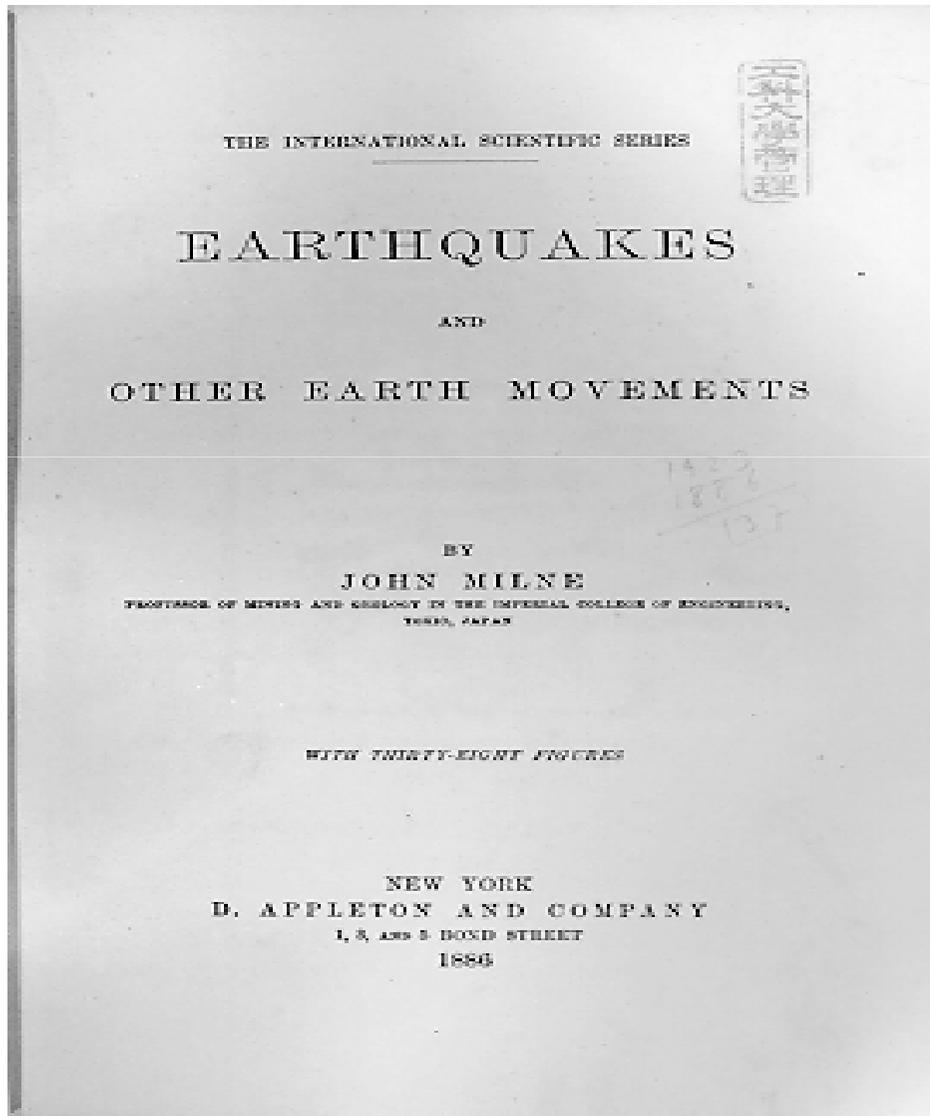
A seconda dei principali fenomeni fisici responsabili della modifica delle caratteristiche del moto sismico è possibile distinguere effetti di sito:

1. **stratigrafici (1D)**
2. **di valle (2D-3D)**
3. **topografici (2D-3D)**



Evidenze di fenomeni di risposta sismica locale

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

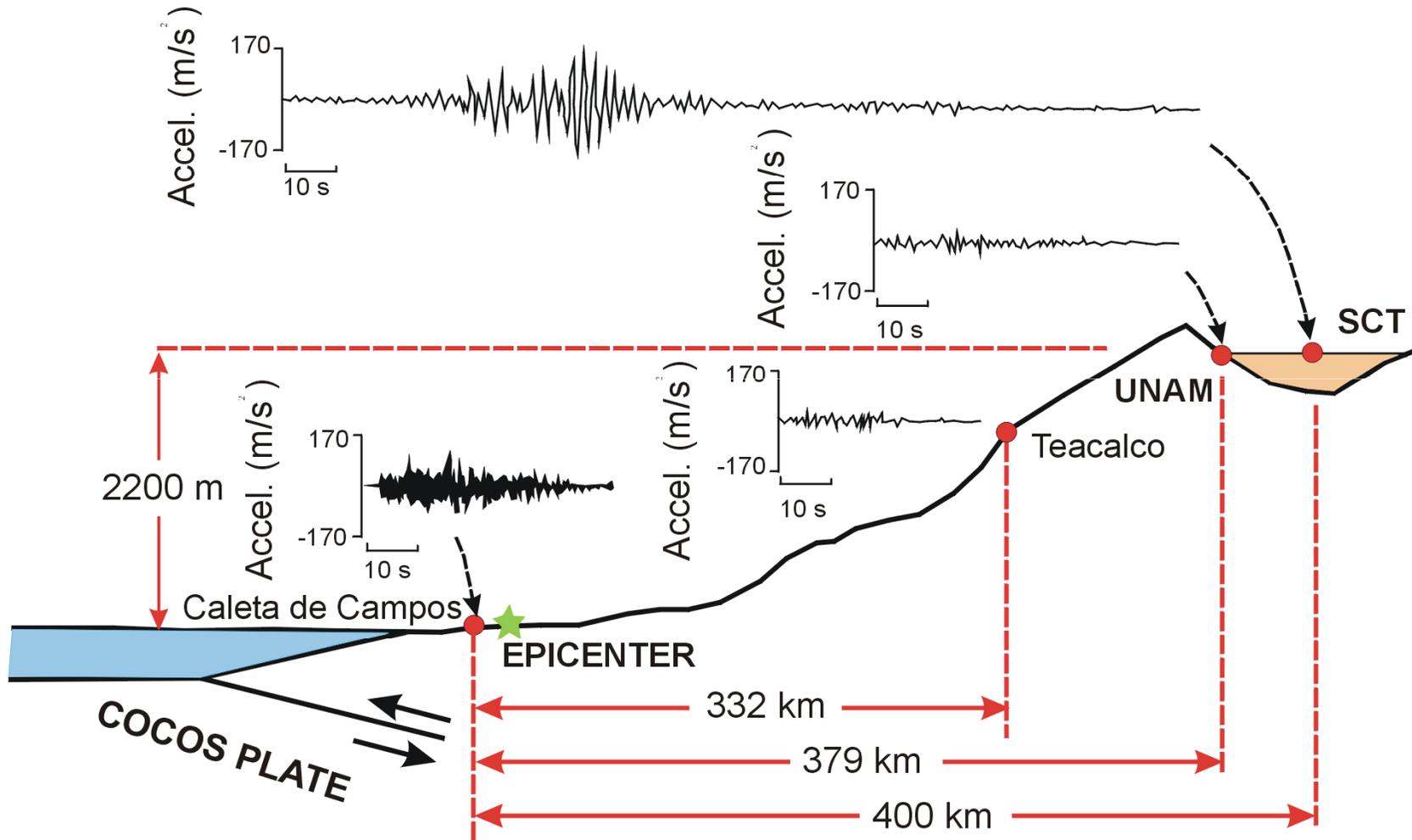


«Sometimes the harder ground proved better foundation, sometimes the softer. The superiority of one over the other depends on local circumstances»

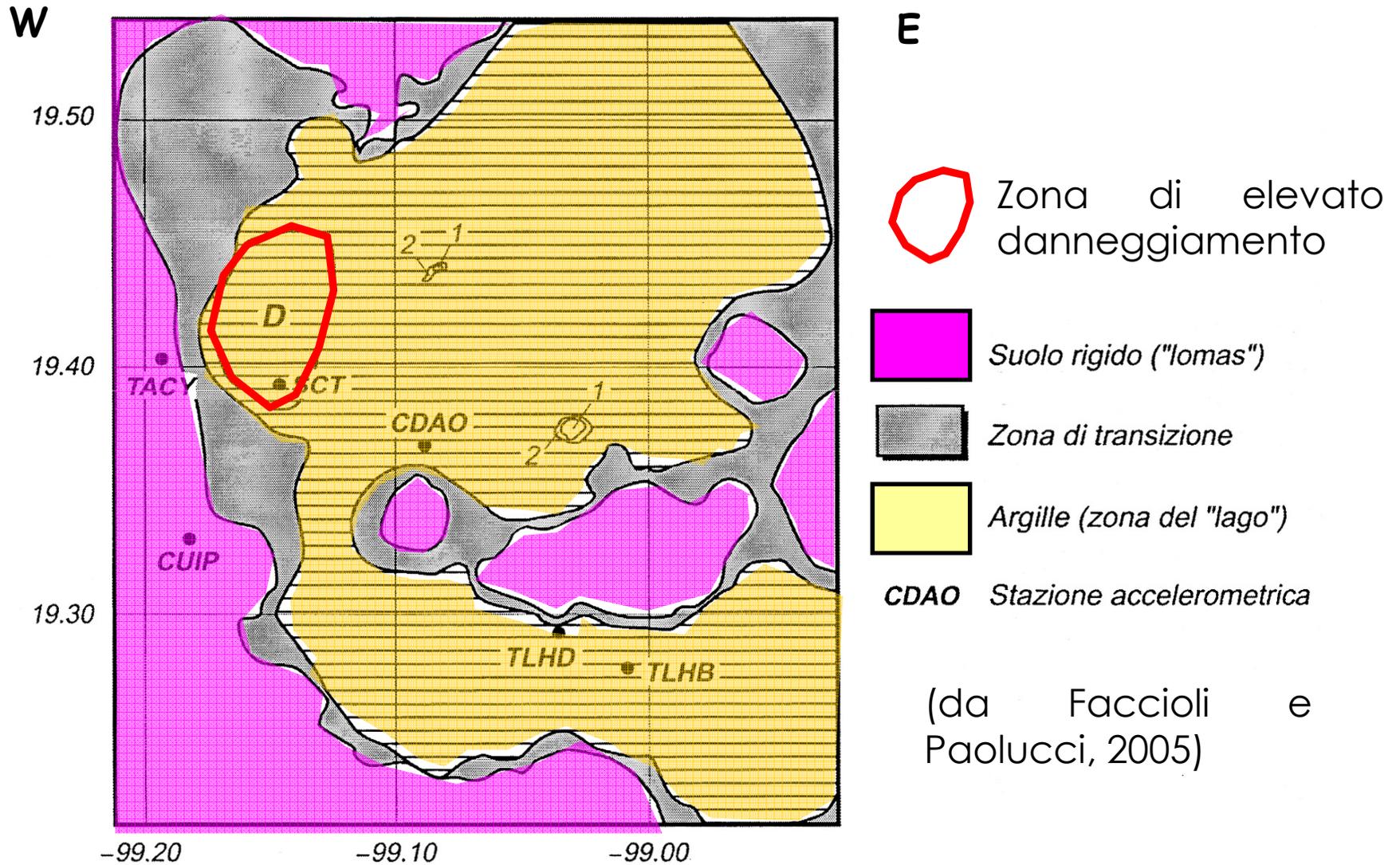
John Milne (1886)

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

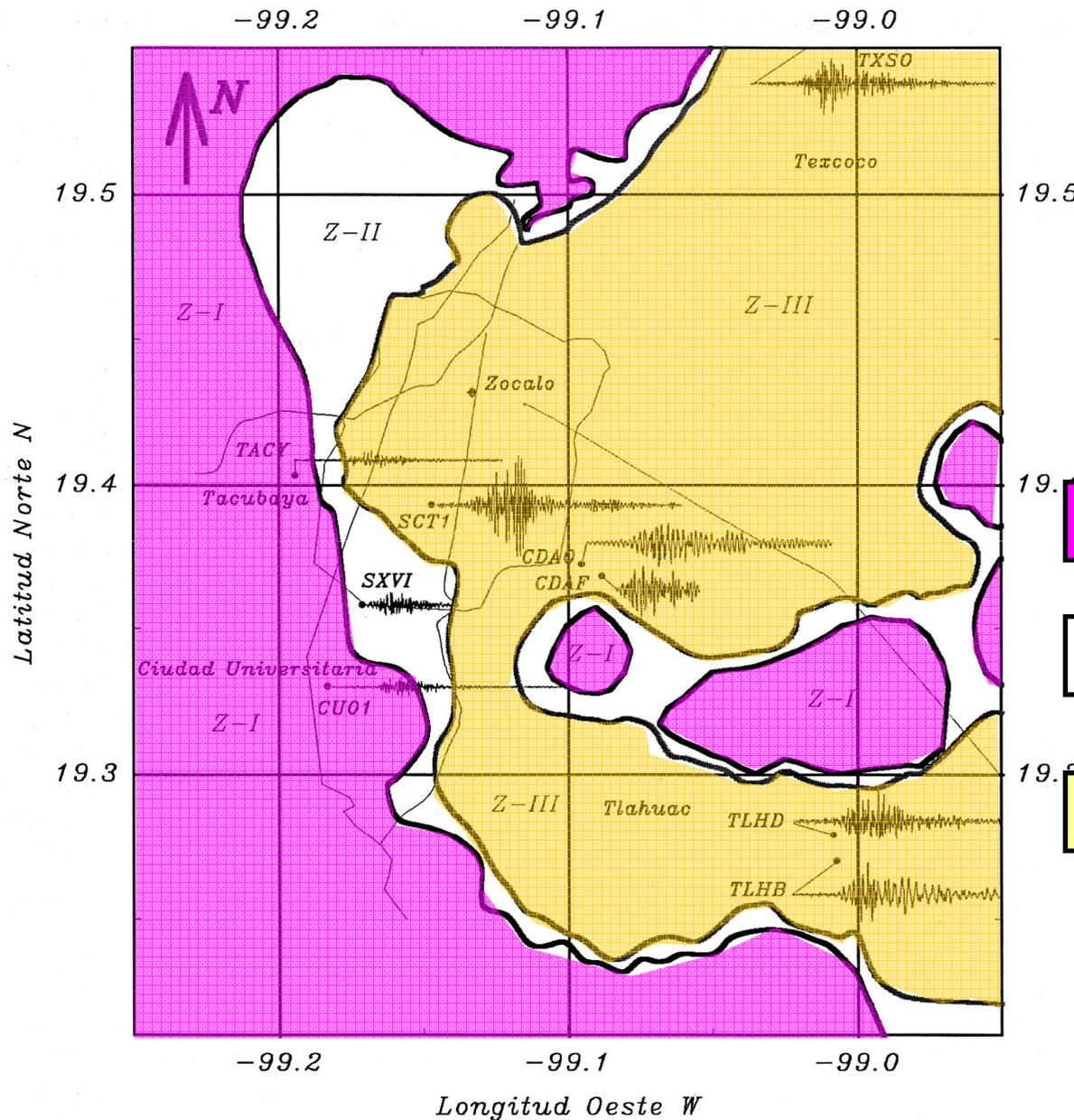
Il terremoto di Città del Messico del 19/09/1985 (M=8.1)



Il terremoto di Città del Messico del 19/09/1985 (M=8.1)



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI



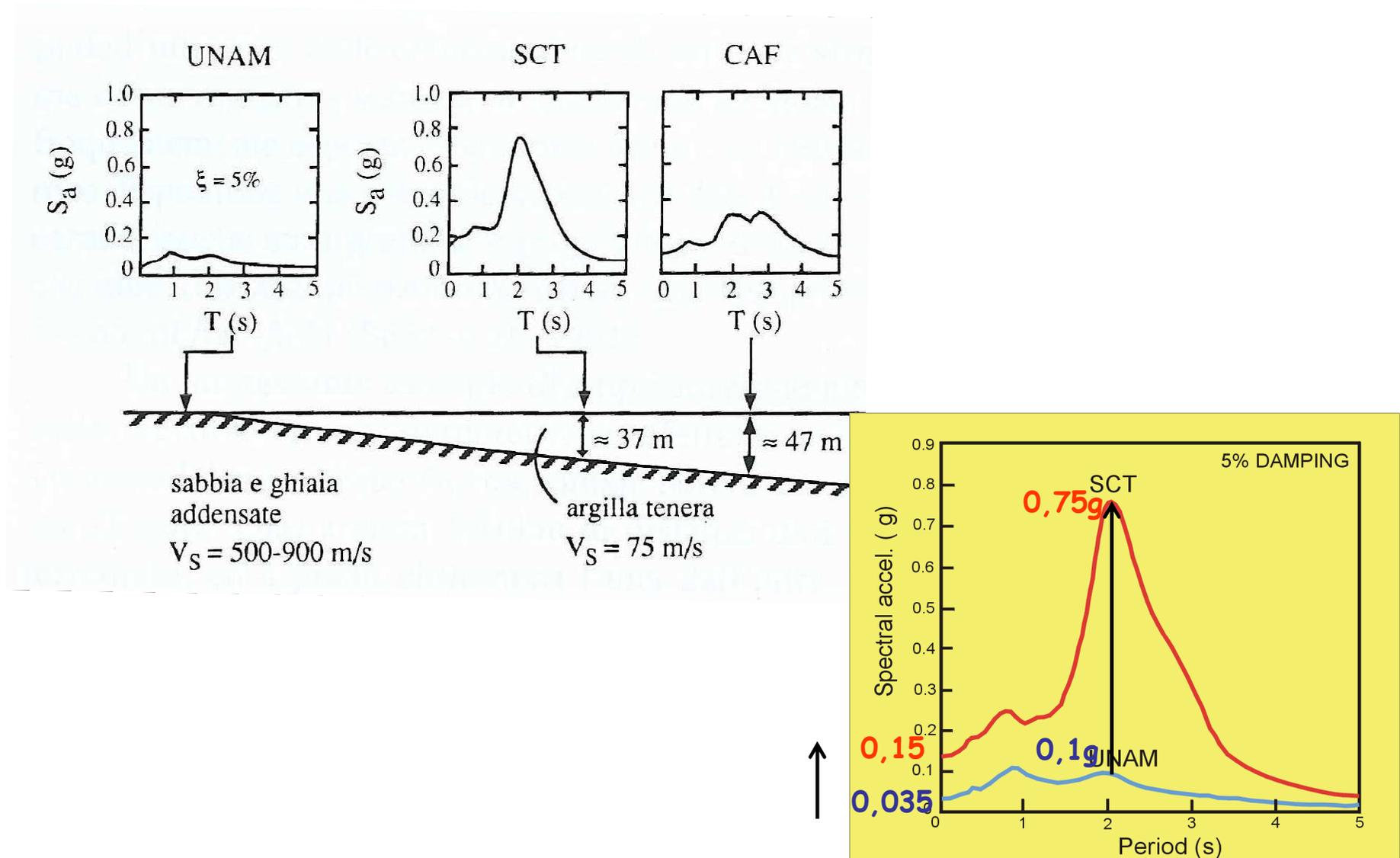
Il terremoto di Città del Messico del 1985

-  zona delle lomas
-  zona di transizione
-  zona del lago

(da Faccioli e Paolucci, 2005)

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Il terremoto di Città del Messico del 19/09/1985 (M=8.1)



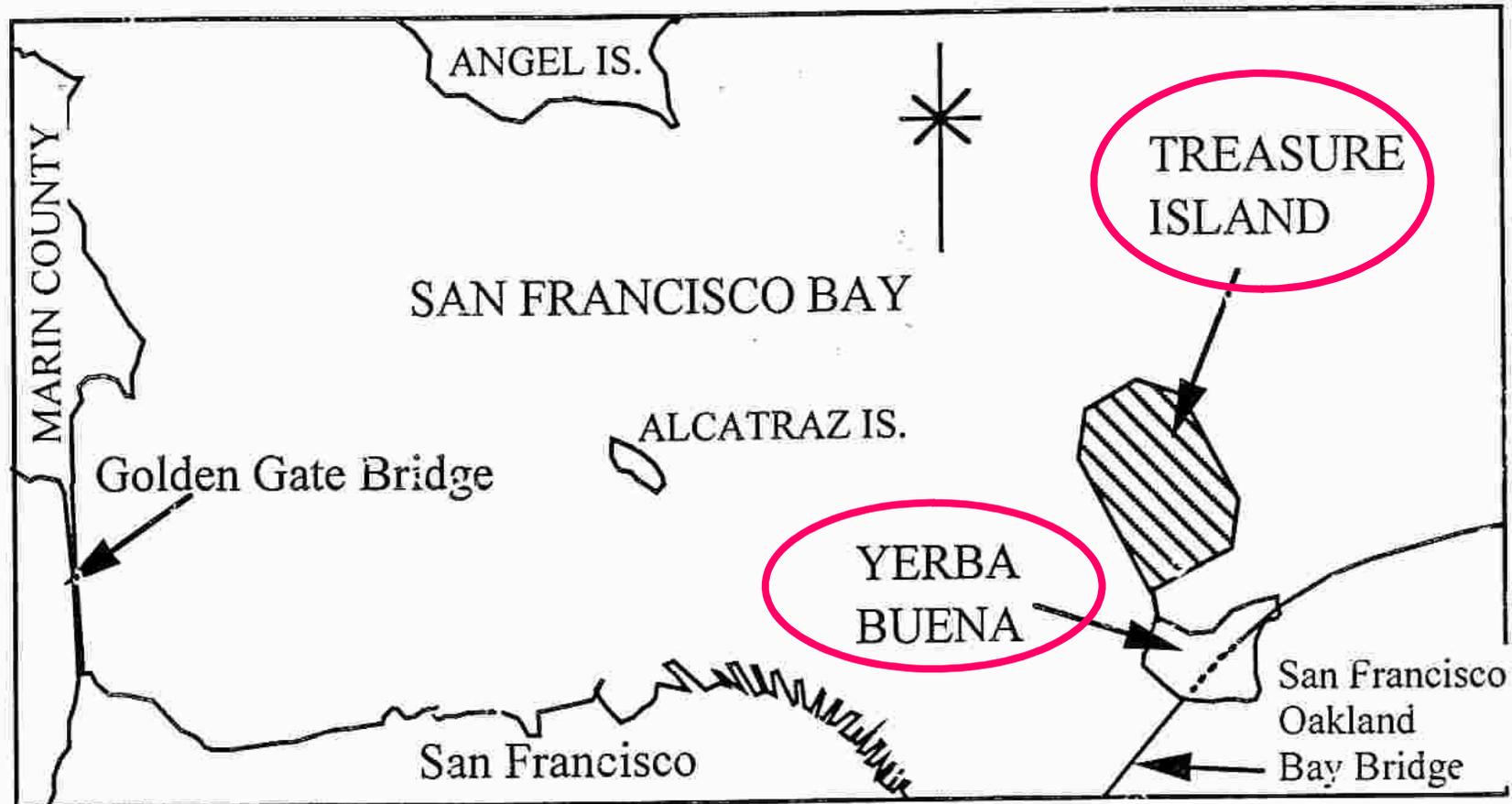
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Il terremoto di Loma Prieta del 17/01/1989 (M=7.1)



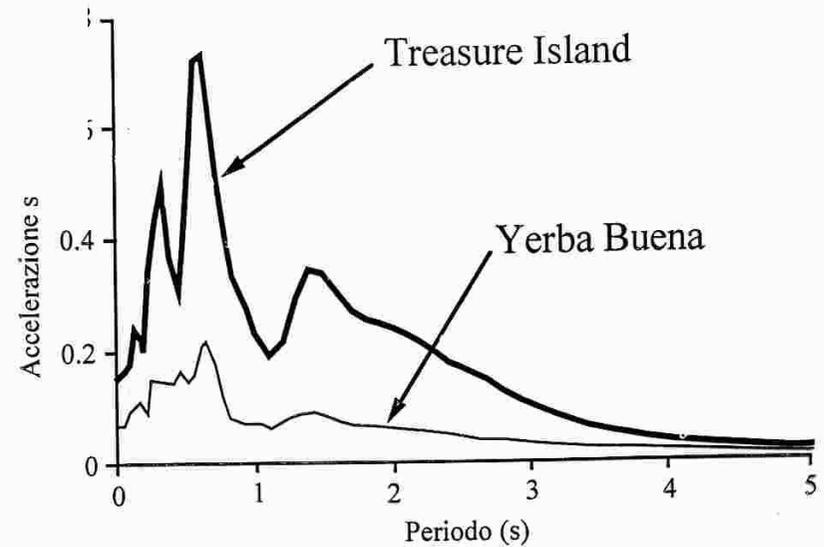
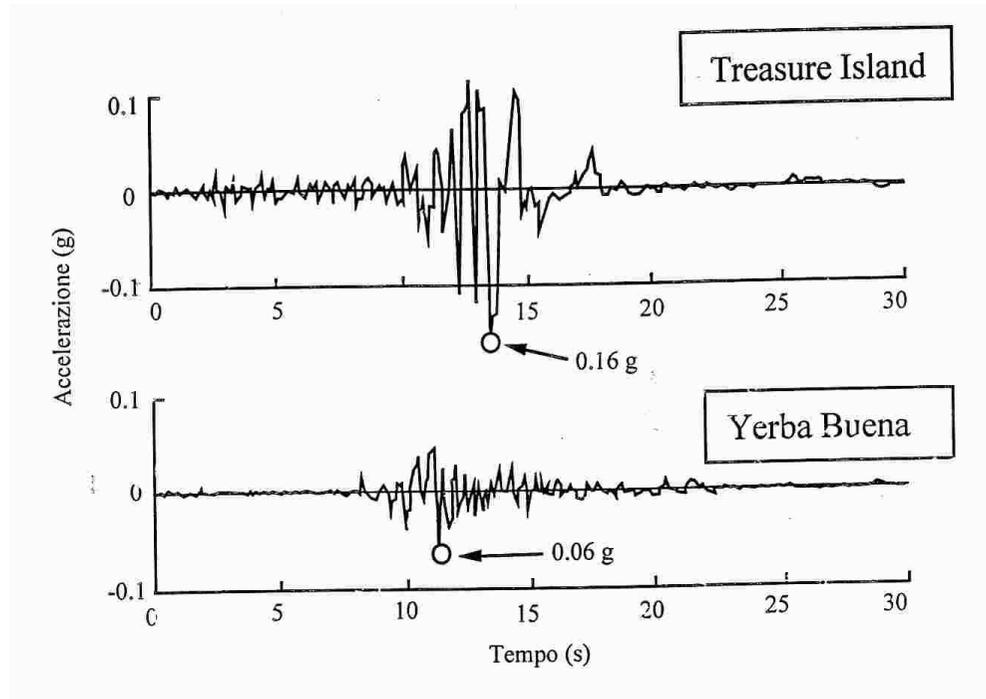
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Il terremoto di Loma Prieta del 17/01/1989 ($M=7.1$)



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Il terremoto di Loma Prieta del 17/01/1989 ($M=7.1$)



Sequenza sismica Umbria- Marche del 1997: il caso di Cesi

Cesi Bassa - IX MCS

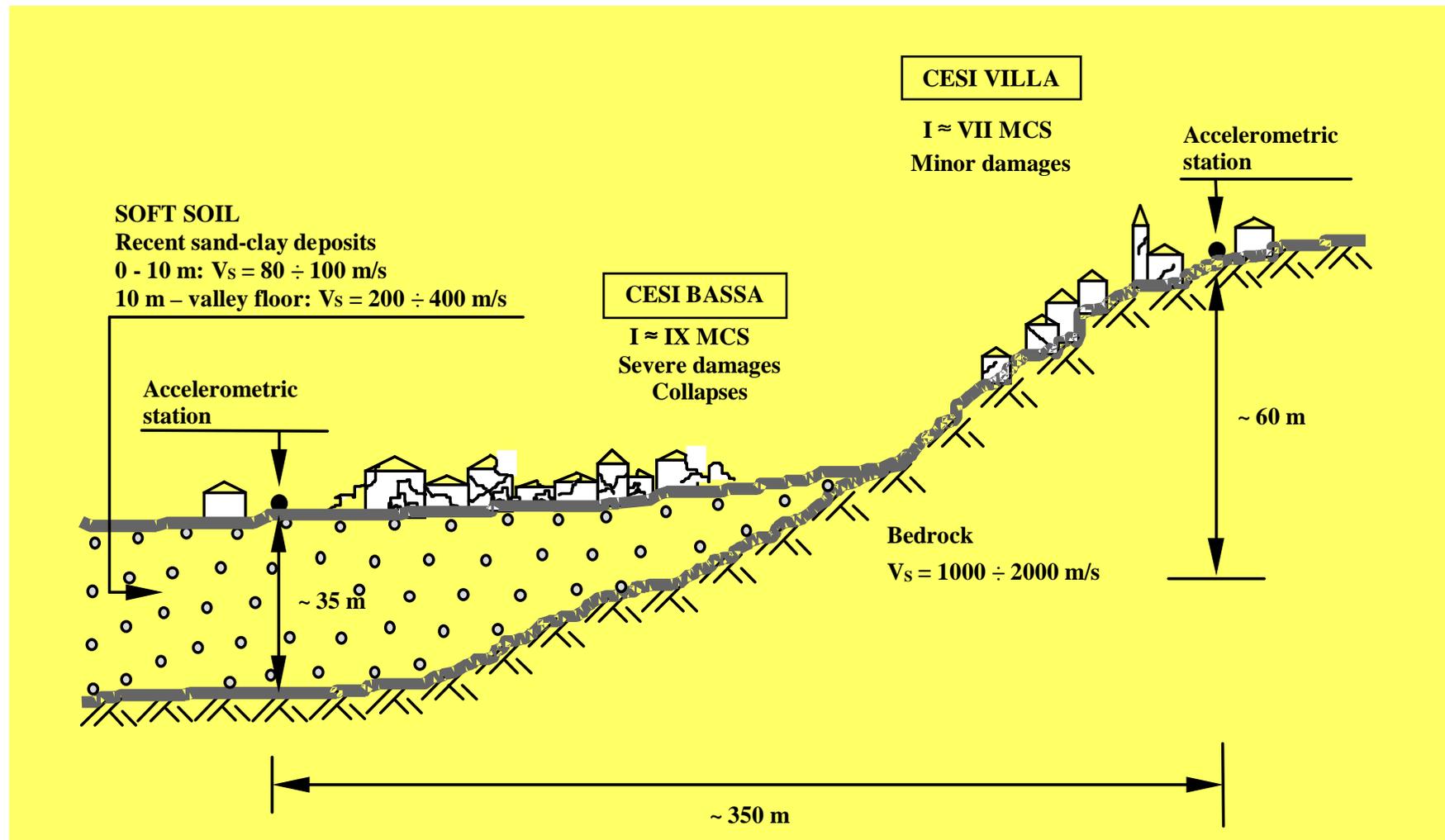


Cesi Villa - VII MCS

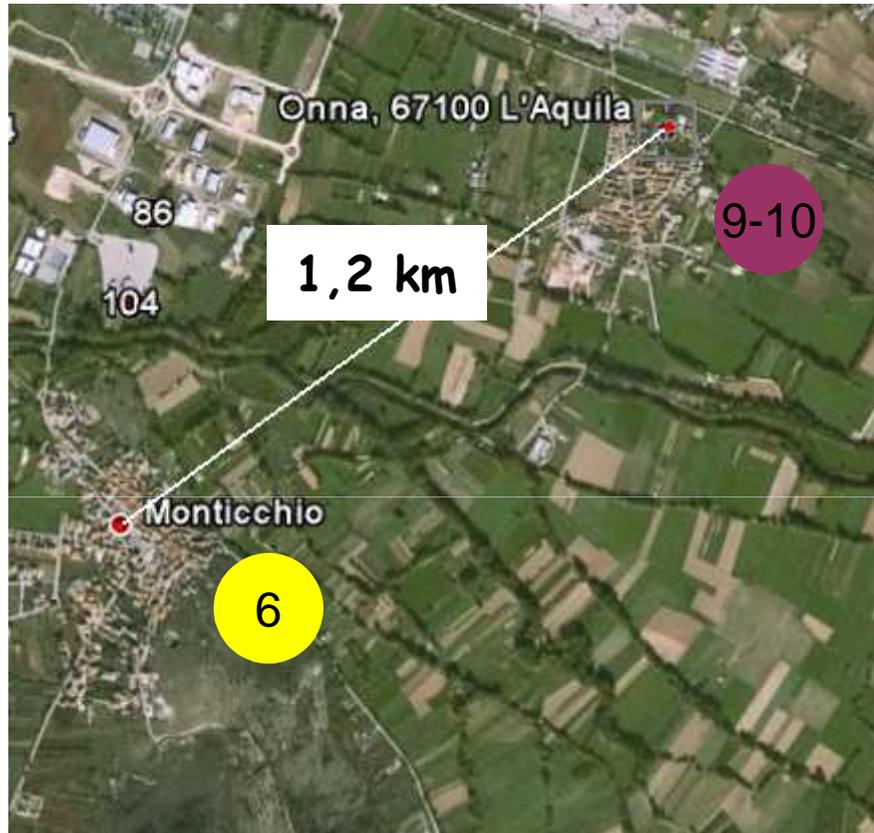


A **Cesi Bassa** i danneggiamenti corrispondono al IX grado MCS, mentre a **Cesi Villa** si hanno danni corrispondenti al VII grado MCS. La distanza tra le due aree è di poche centinaia di metri e le costruzioni non presentano differenze di vulnerabilità tali da spiegare le differenze di intensità macrosismica di due gradi osservate.

Sequenza sismica Umbria- Marche del 1997: il caso di Cesi



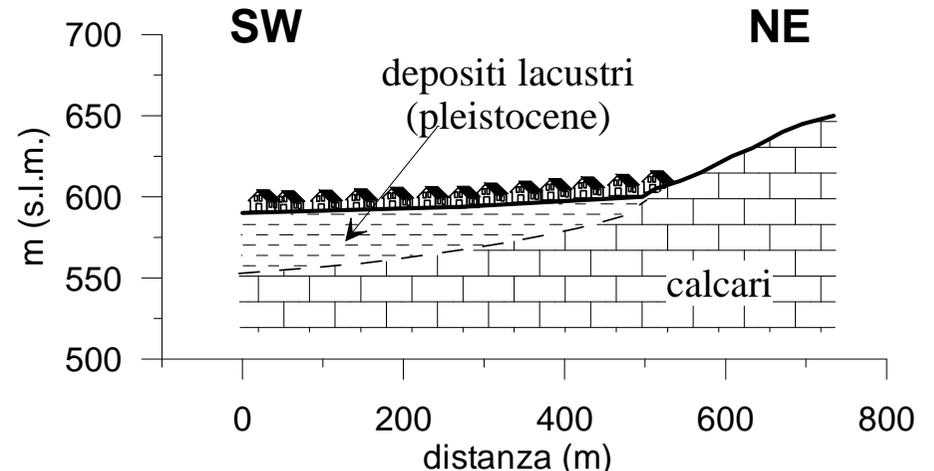
Il terremoto de L'Aquila del 06/04/2009 (M=6.3)



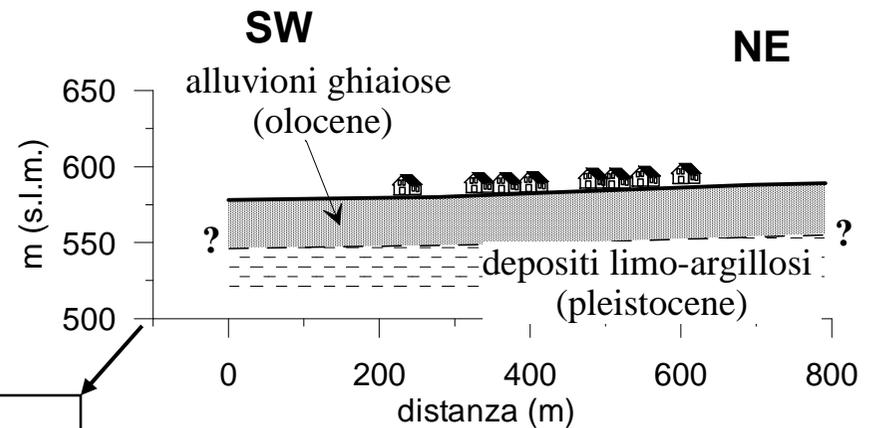
Distanza epicentrale \cong 12 km

Terremoto del 1461
Onna completamente distrutta

Monticchio



Onna



(cortesia Dott. Di Capua, INGV)

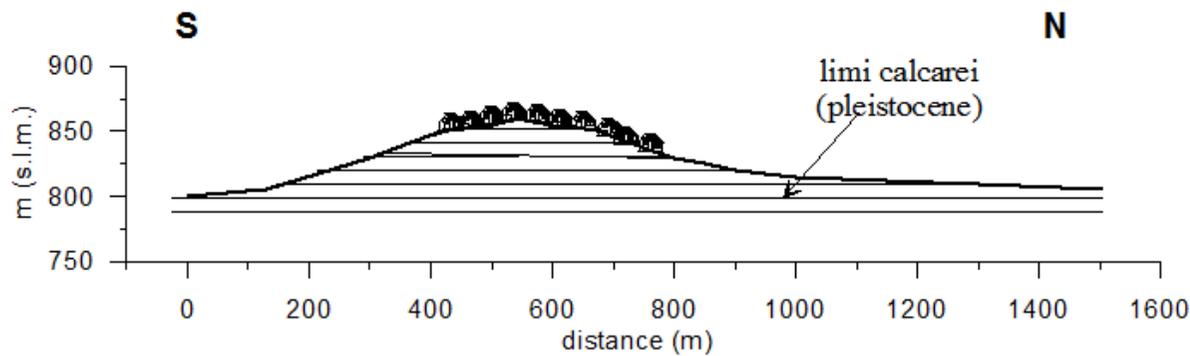
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Il terremoto de L'Aquila del 06/04/2009 (M=6.3)



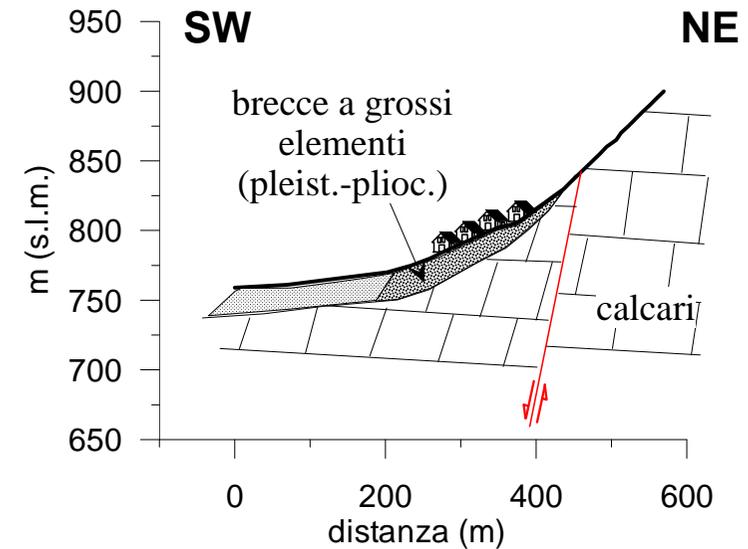
Distanza epicentrale \cong 25 km

Castelnuevo
(I=IX-X MCS d=25 km)



(a)

San Pio delle Camere



Terremoti del
1461,
1703, 1762
Castelnuevo
completamente
distrutta

(cortesia Dott. Di Capua, INGV)

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

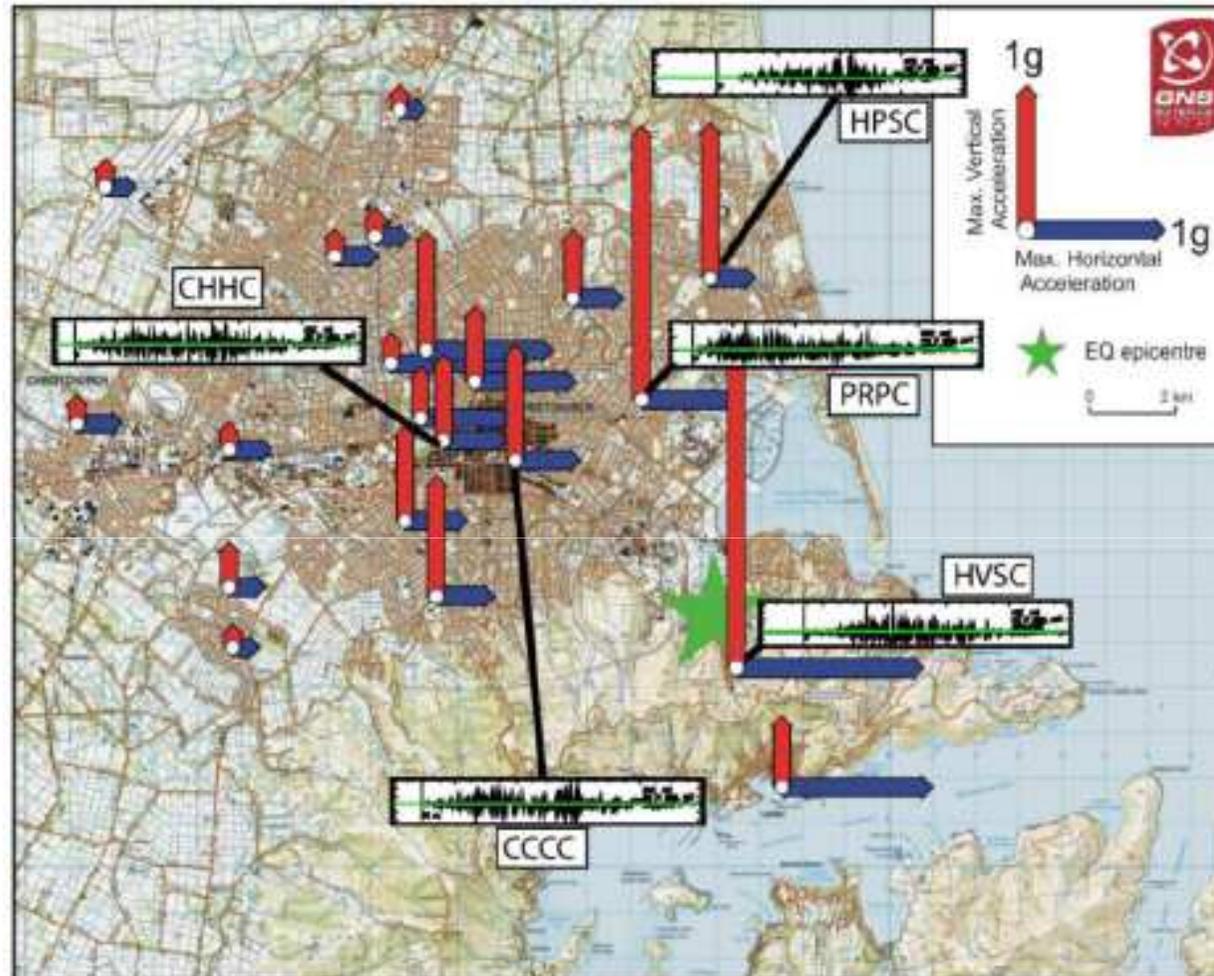
Il terremoto de L'Aquila del 06/04/2009 (M=6.3)

Danni a Castelnuovo



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

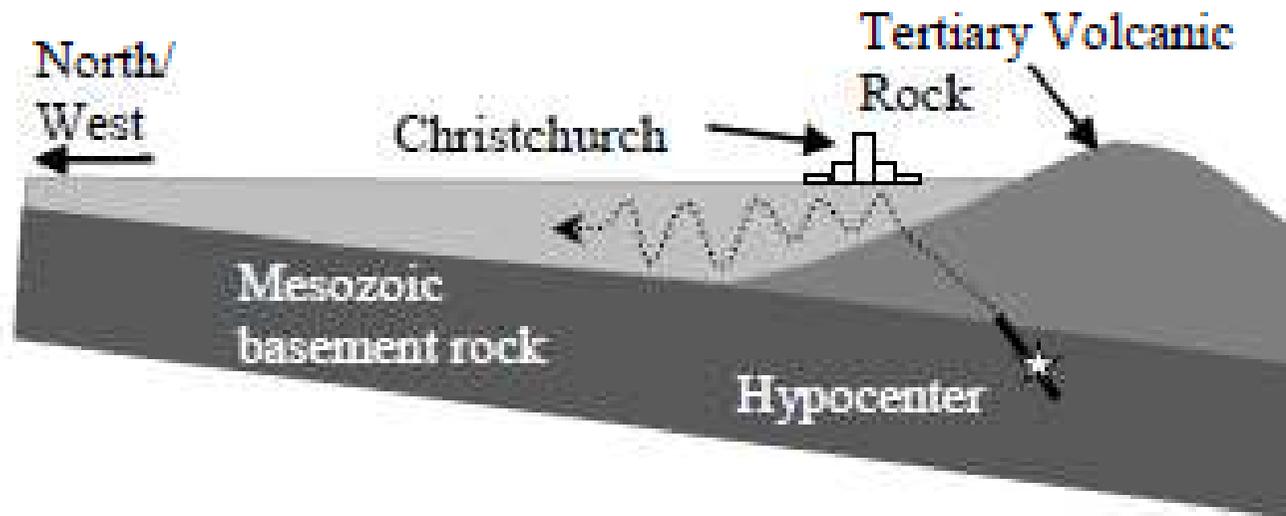
Il terremoto di Christchurch del 22/02/2011 (M=6.3)



Valori di PGA, orizzontale e verticale, nelle stazioni di registrazione

Il terremoto di Christchurch del 22/02/2011 (M=6.3)

I valori di PGA sono fortemente influenzati dalla vicinanza delle stazioni di registrazione alla zona di rottura della faglia ma anche dalla presenza di effetti di valle dovuti alla generazione di onde di superficie in corrispondenza dei bordi della valle.



**Come si quantifica la
risposta sismica locale?**

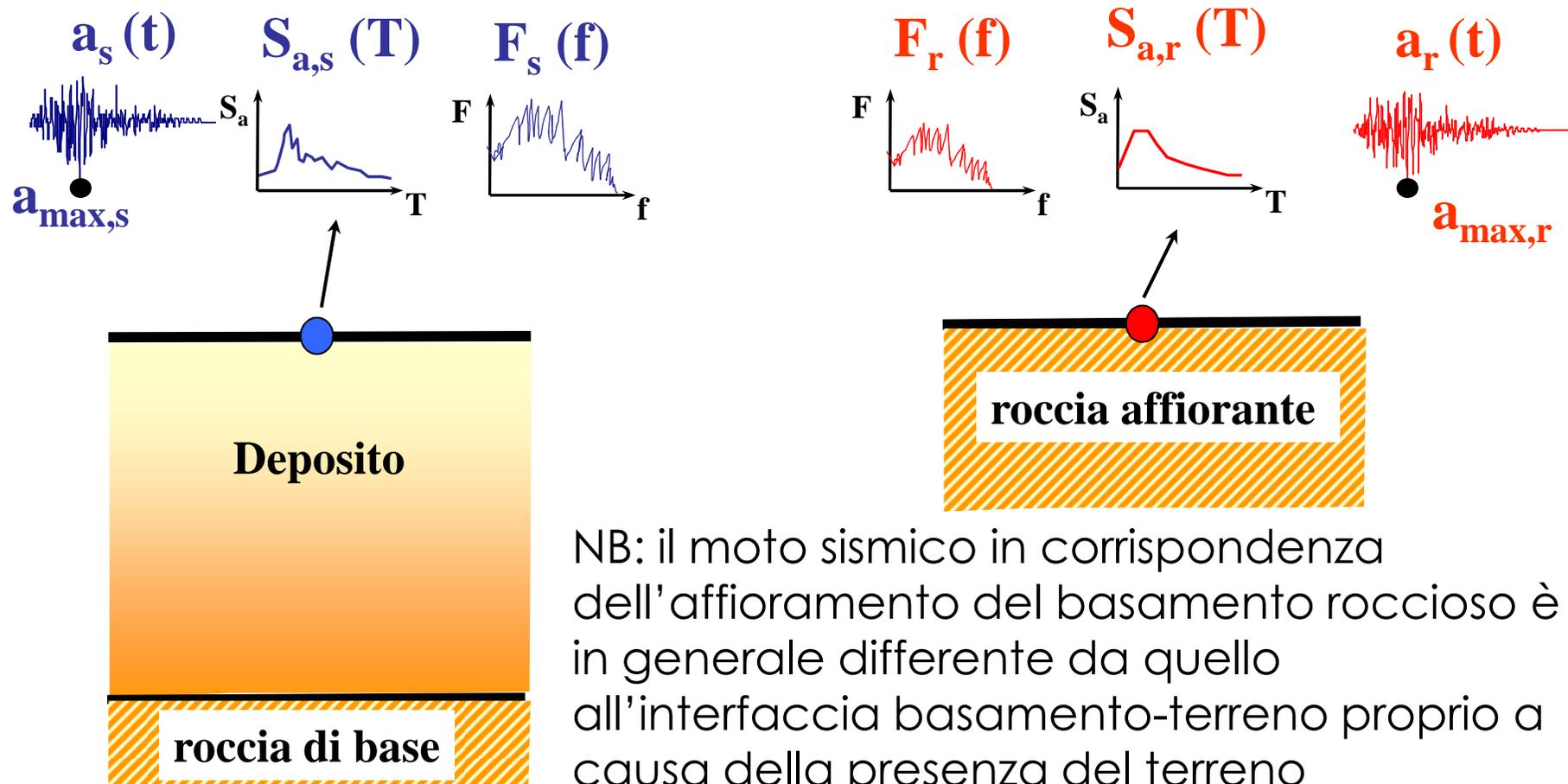
Valutazione quantitativa della RSL

Confronto tra parametri rappresentativi del moto sismico alla superficie del deposito e su roccia affiorante

- **Valore di picco dell'accelerazione, a_{\max} o PGA**
- **Spettro di Fourier $F(f)$**
- **Spettro di risposta dell'accelerazione $S_a(T)$**

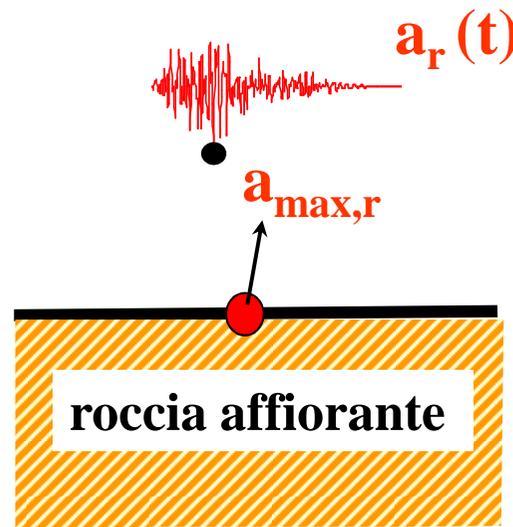
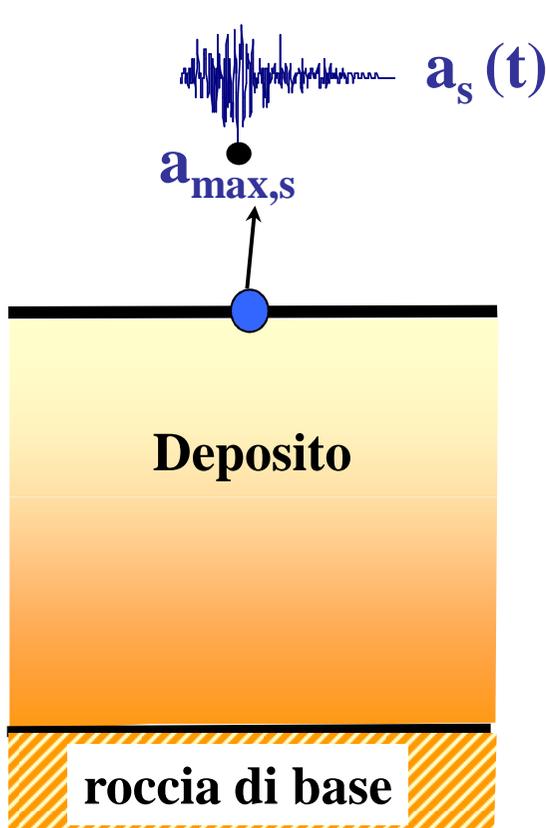
Valutazione quantitativa della RSL

Confronto tra parametri rappresentativi del moto sismico alla superficie del deposito e su roccia affiorante



NB: il moto sismico in corrispondenza dell'affioramento del basamento roccioso è in generale differente da quello all'interfaccia basamento-terreno proprio a causa della presenza del terreno

Valutazione della RSL in termini di a_{\max}



**Fattore di
amplificazione**

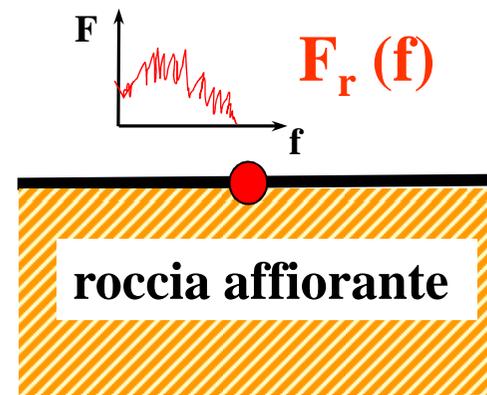
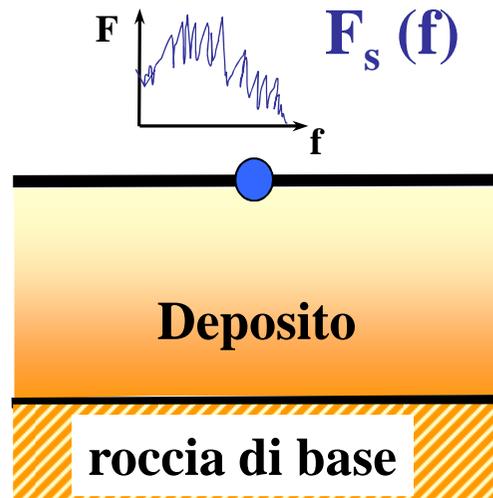
$$A_a = \frac{a_{\max,s}}{a_{\max,r}}$$

Il termine “**fattore di amplificazione**” è in realtà improprio in quanto esso può assumere valori sia maggiori che inferiori all’unità e quindi possono esserci tanto fenomeni amplificativi che deamplificativi del moto

Valutazione della RSL in termini di spettri di Fourier

Funzione di trasferimento $H(f)$

rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie e lo spettro di Fourier del segnale su roccia affiorante



$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_r(f)}$$

Valutazione della RSL in termini di spettri di Fourier

Funzione di amplificazione $A(f)$

La funzione di amplificazione $A(f)$ è il modulo della funzione di trasferimento $H(f)$

$$A(f) = |H(f)|$$

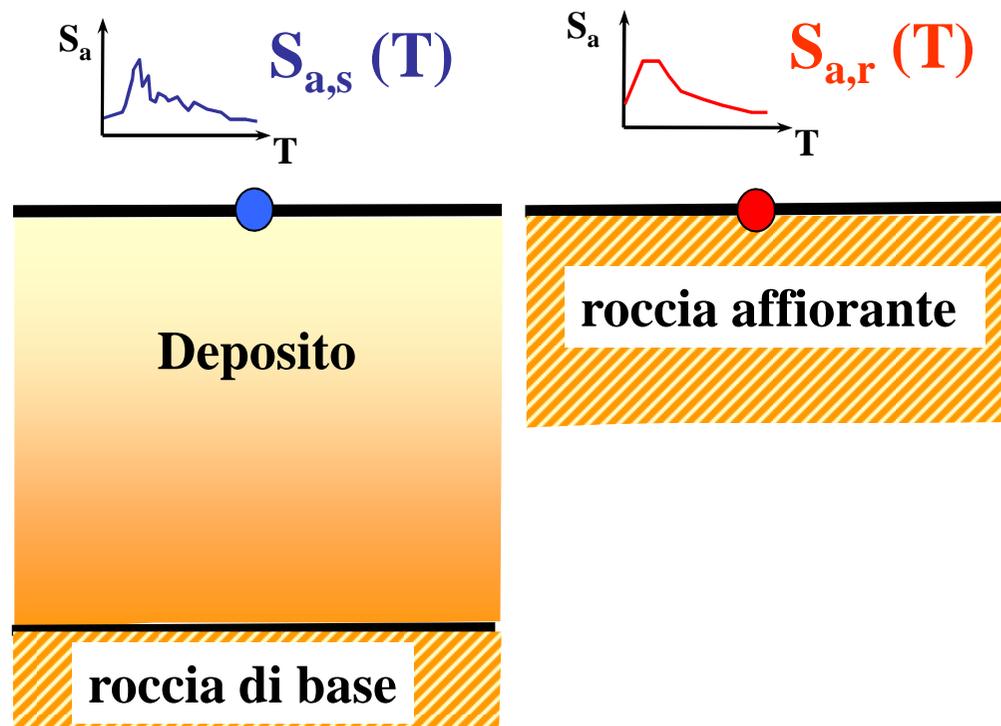
$A(f)$ indica quali componenti del moto sismico sono state amplificate nel passaggio attraverso il terreno, quali sono state smorzate e in quale rapporto.

Fornisce quindi una descrizione sintetica ed efficace dell'**effetto filtrante** esercitato dal terreno sul moto sismico

Valutazione della RSL in termini di spettri di risposta

Funzione di amplificazione $A(T)$

confronto tra gli spettri di risposta del moto sismico alla superficie del deposito e all'affioramento roccioso



$$A(T) = \frac{S_{a,s}(T)}{S_{a,r}(T)}$$

Importanti aspetti da chiarire

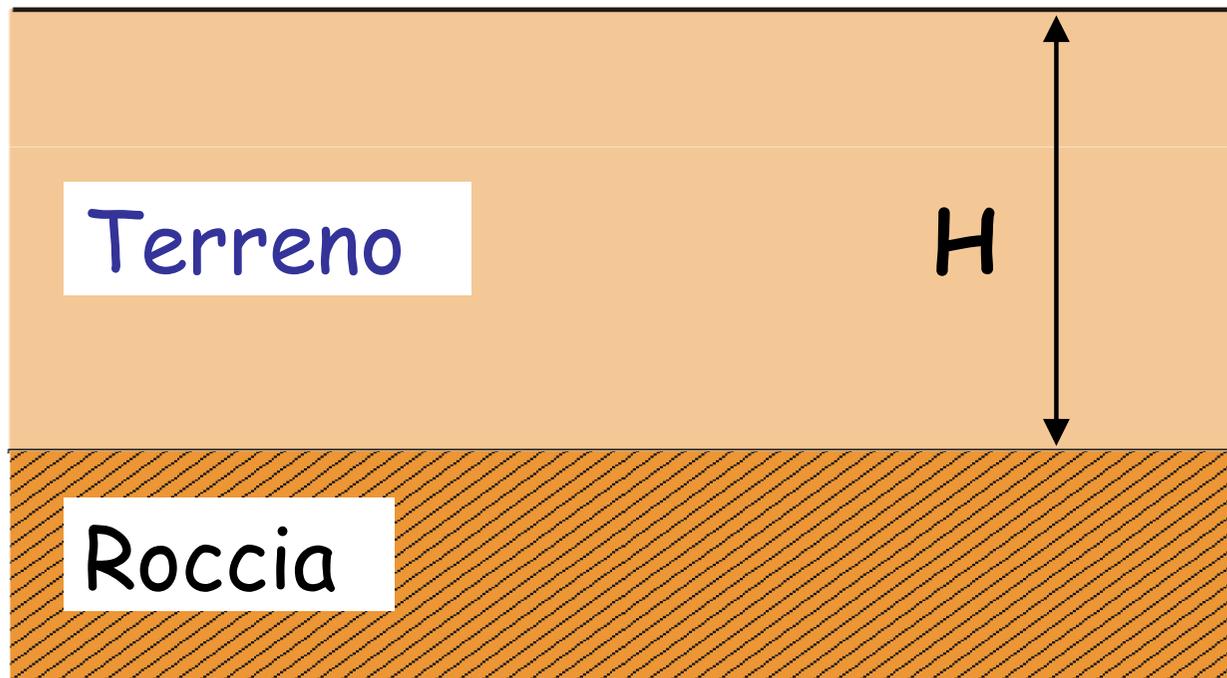
- quali sono i parametri geotecnici che controllano la RSL?
- in che modo le proprietà dinamiche dei terreni influenzano la RSL?
- Influenza di fattori geotecnici (non linearità, eterogeneità, etc.)
- RSL in presenza di geometrie bidimensionali

RSL di un sottosuolo IDEALE

Un modello 1D per lo studio della RSL

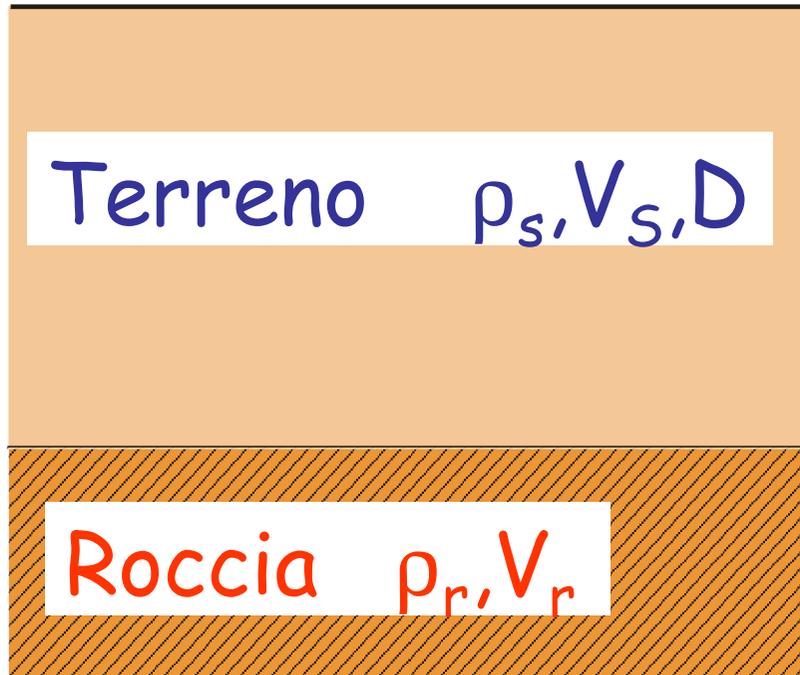
Parametri del modello 1D

- **Parametri geometrici** : spessore del deposito di terreno H



Parametri del modello 1D

- Parametri fisici e meccanici



Terreno

ρ_s = densità

V_s = velocità onde di taglio

D = fattore di smorzamento

$\rho_s V_s$ = impedenza sismica

Roccia

ρ_r = densità

V_r = velocità onde di taglio

$D = 0$

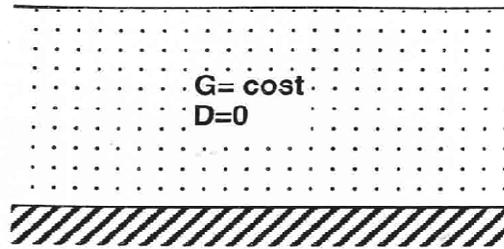
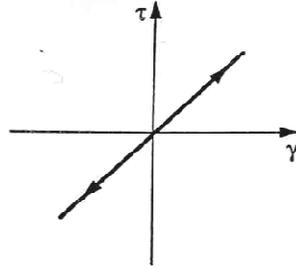
$\rho_r V_r$ = impedenza sismica

$$I = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s}$$

Rapporto di impedenza roccia-terreno

Schemi di sottosuolo 1D

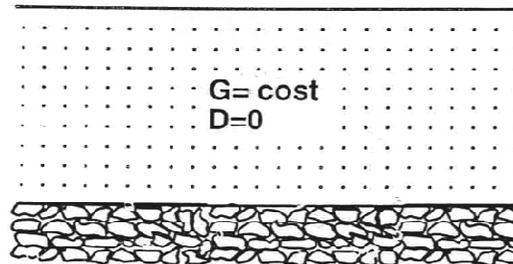
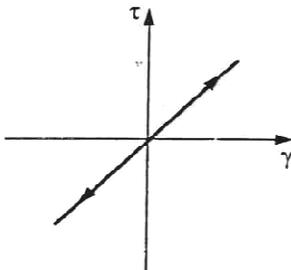
SCHEMA DI BASE



Strato elastico omogeneo

Substrato rigido

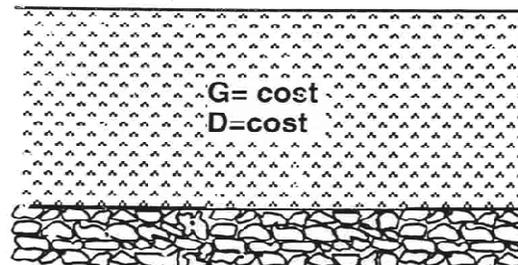
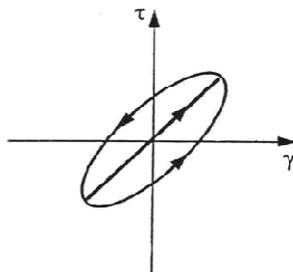
EFFETTO DEFORMABILITA' SUBSTRATO



Strato elastico omogeneo

Substrato deformabile

EFFETTO SMORZAMENTO



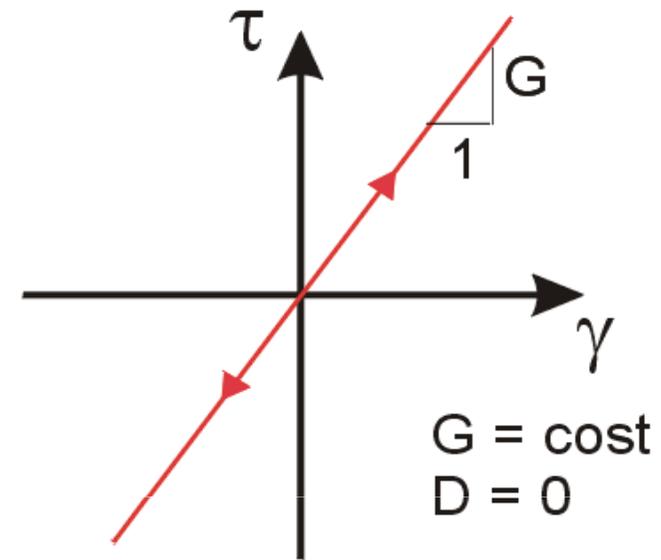
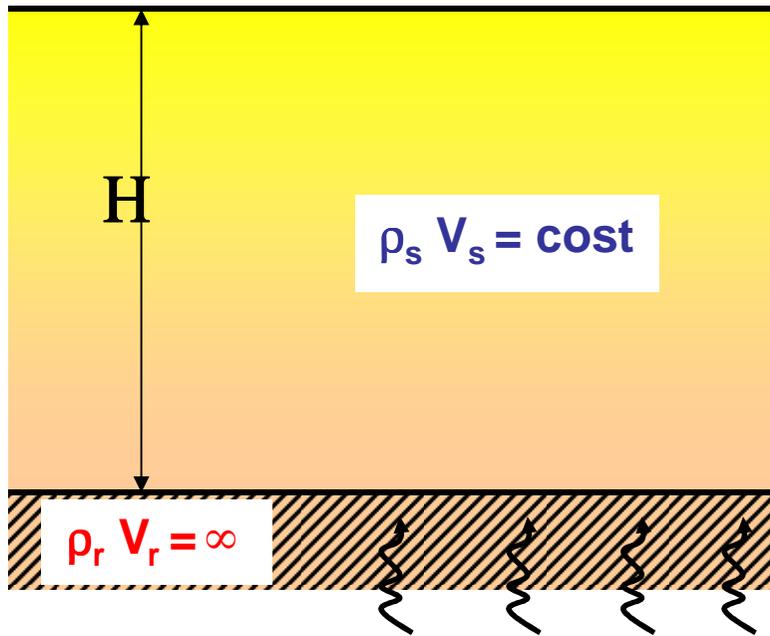
Strato visco-elastico omogeneo

Substrato deformabile

**Strato omogeneo elastico
su substrato rigido**

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Strato omogeneo elastico su substrato rigido



- onda S incidente sinusoidale di pulsazione $\omega=2\pi f$
- basamento roccioso indeformabile
- terreno a comportamento elastico lineare

Strato omogeneo elastico su substrato rigido

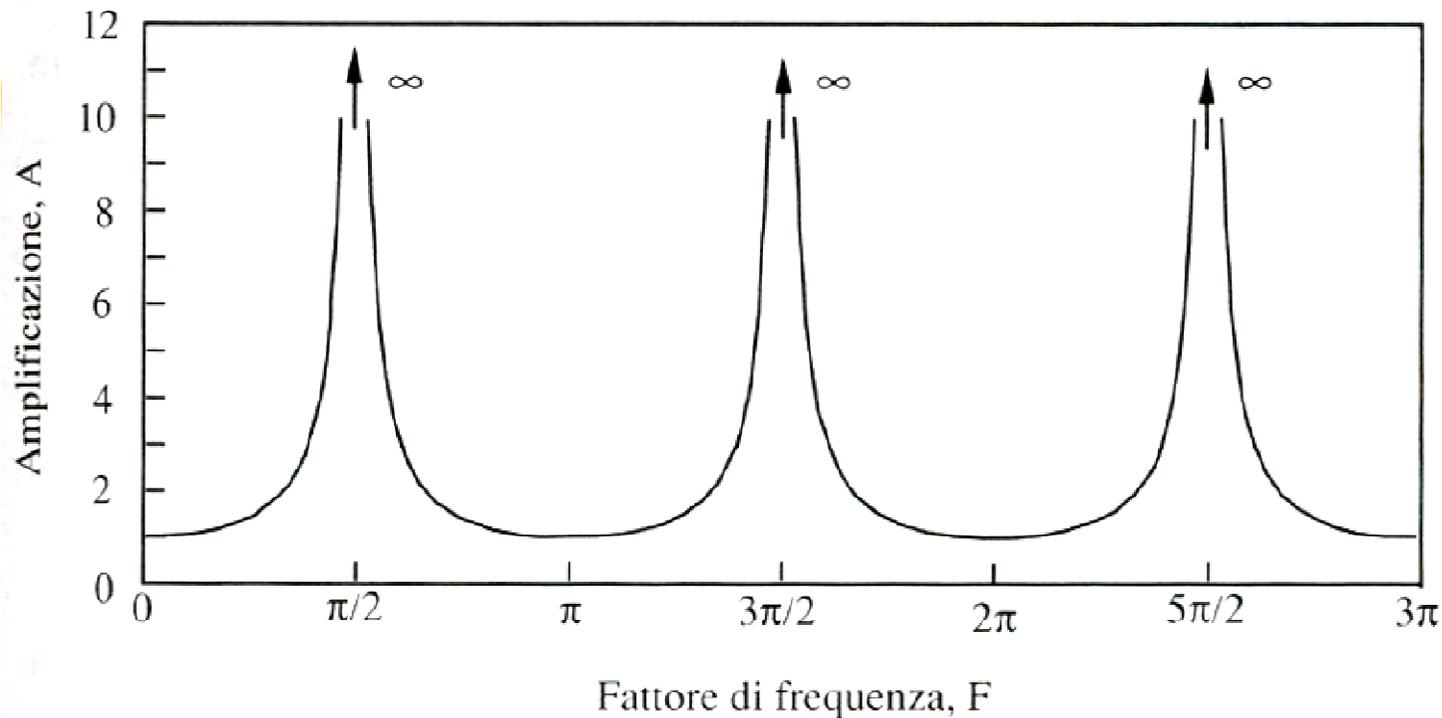
Funzione di amplificazione per
substrato rigido

$$A_r(\omega) = \frac{1}{\cos F}$$

$$F = \frac{\omega H}{V_S}$$

Fattore di frequenza

Strato omogeneo elastico su substrato rigido



- A_r assume sempre valori o maggiori dell'unità
- A_r diviene infinita in corrispondenza dei valori di frequenza:

$$\frac{\omega H}{V_s} = \frac{\pi}{2} + n\pi \quad \Rightarrow \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{2\pi H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right) \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

Strato omogeneo elastico su substrato rigido

Le frequenze corrispondenti ai massimi della funzione di amplificazione si chiamano **frequenze naturali di vibrazione** dello strato :

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{2\pi H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right)$$

Analogamente si possono definire i **periodi naturali di vibrazione** dello strato:

$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{4H}{V_s(2n+1)}$$

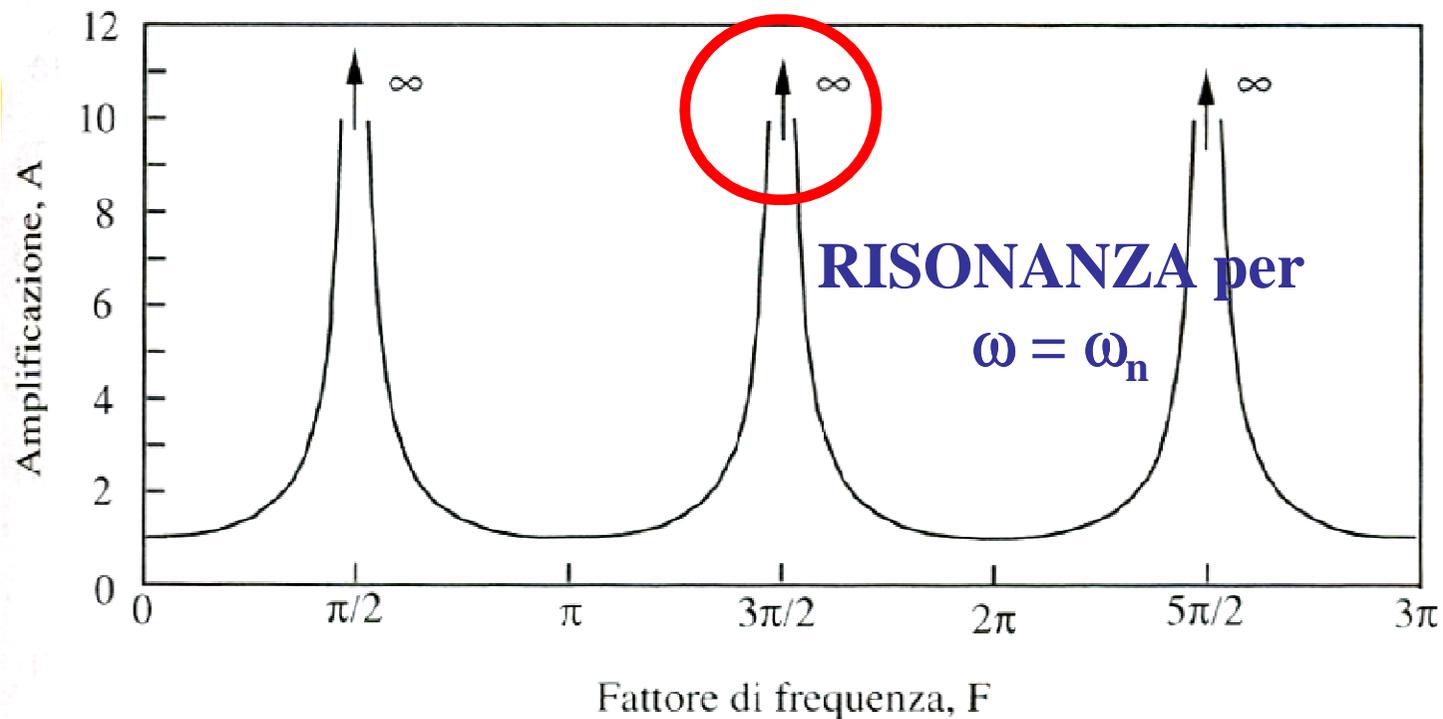
Le frequenze naturali, in corrispondenza delle quali si verificano elevate amplificazioni, dipendono da:

- geometria (spessore)
- caratteristiche fisico-meccaniche (velocità delle onde di taglio) del terreno costituente il deposito

Strato omogeneo elastico su substrato rigido

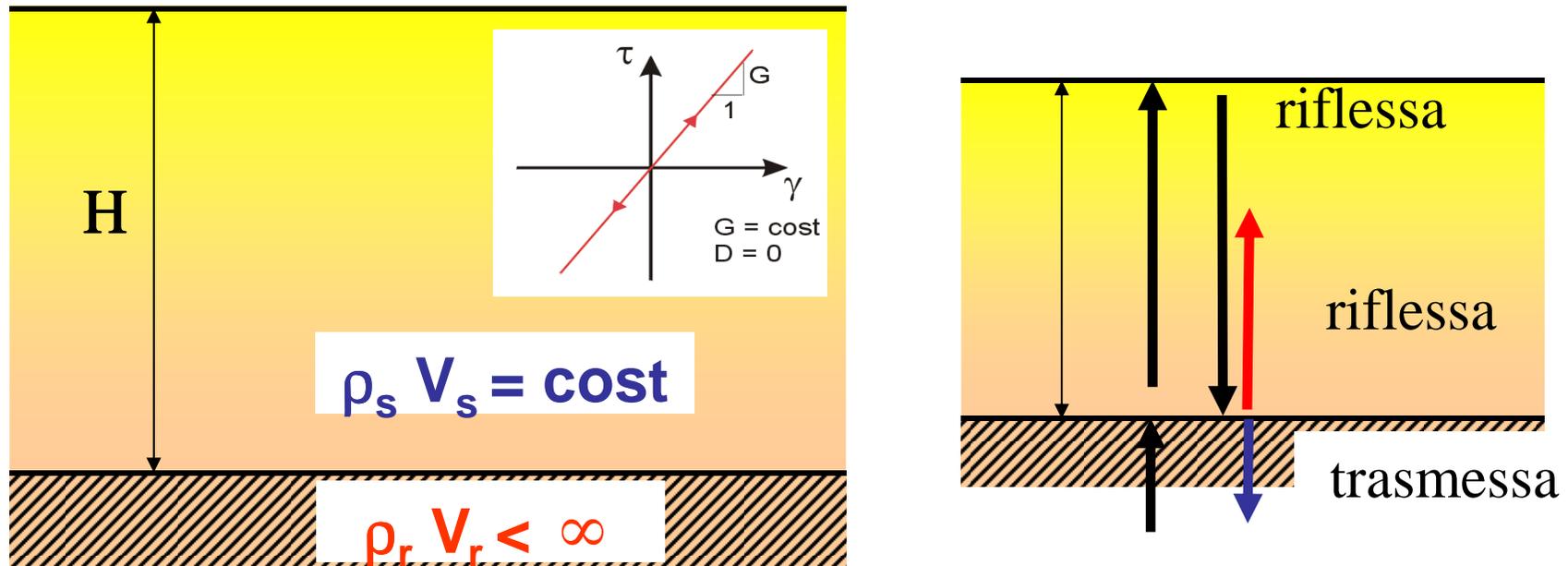
La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ω_n (risonanza)

In queste condizioni l'ampiezza del moto è teoricamente infinita.



**Strato omogeneo elastico
su substrato deformabile**

Strato omogeneo elastico su substrato deformabile



Le onde che si propagano verso il basso, a seguito della riflessione sulla superficie del terreno, sono in parte riflesse all'interno dello strato e in parte trasmesse nella roccia sottostante (smorzamento geometrico o di radiazione)

Nel precedente caso di basamento rigido le onde sono invece completamente riflesse dal substrato e restano "imprigionate" nello strato dando luogo ad amplificazioni irrealistiche

Strato omogeneo elastico su substrato deformabile

**Funzione di amplificazione
per substrato deformabile**

$$A_d(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 F + \frac{1}{I^2} \sin^2 F}}$$

$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$

Fattore di frequenza

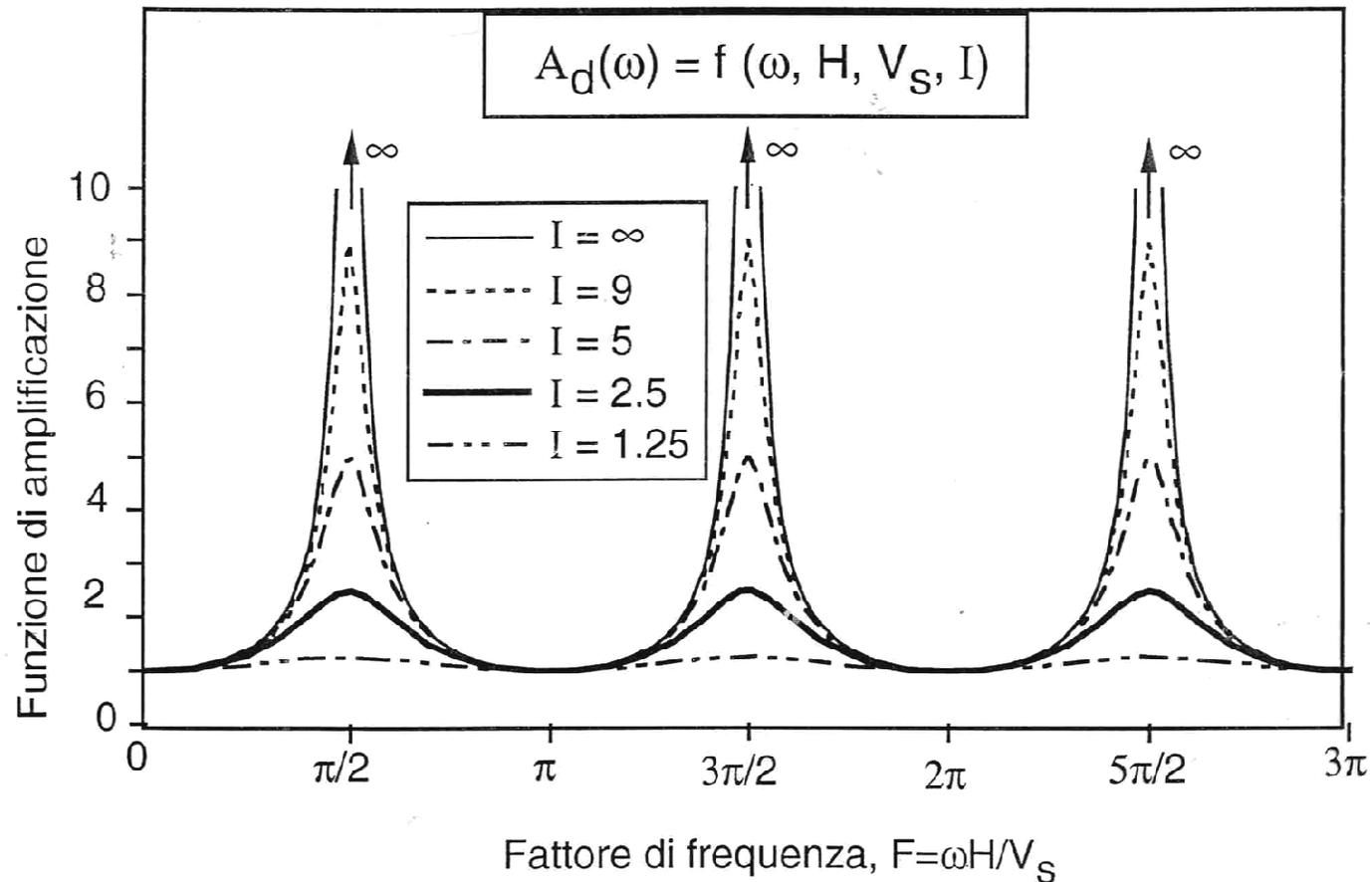
$$I = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s}$$

Rapporto di impedenza roccia-terreno

La funzione di amplificazione dipende oltre che dalle proprietà meccaniche del terreno, anche da quelle della roccia di base attraverso il rapporto di impedenza I

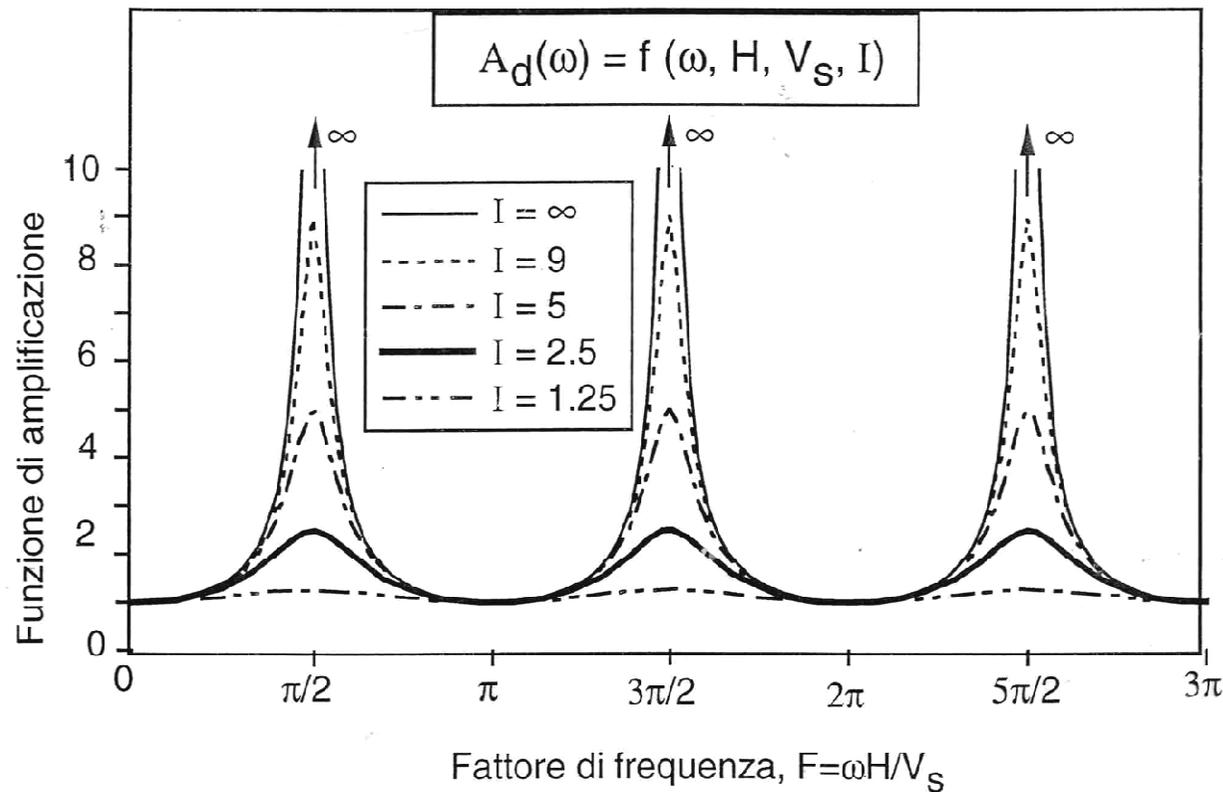
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Strato omogeneo elastico su substrato deformabile



Le frequenze naturali ω_n (f_n) risultano invariate rispetto al caso precedente e non sono quindi affette dalla deformabilità del substrato

Strato omogeneo elastico su substrato deformabile



$$A_d(\omega_n) = I$$

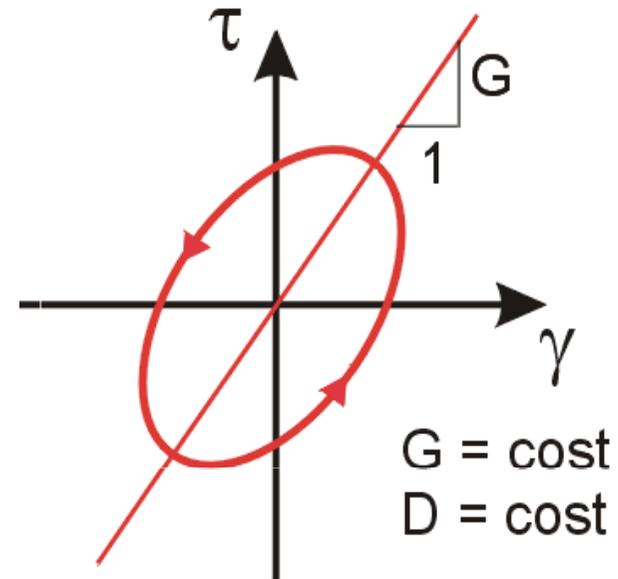
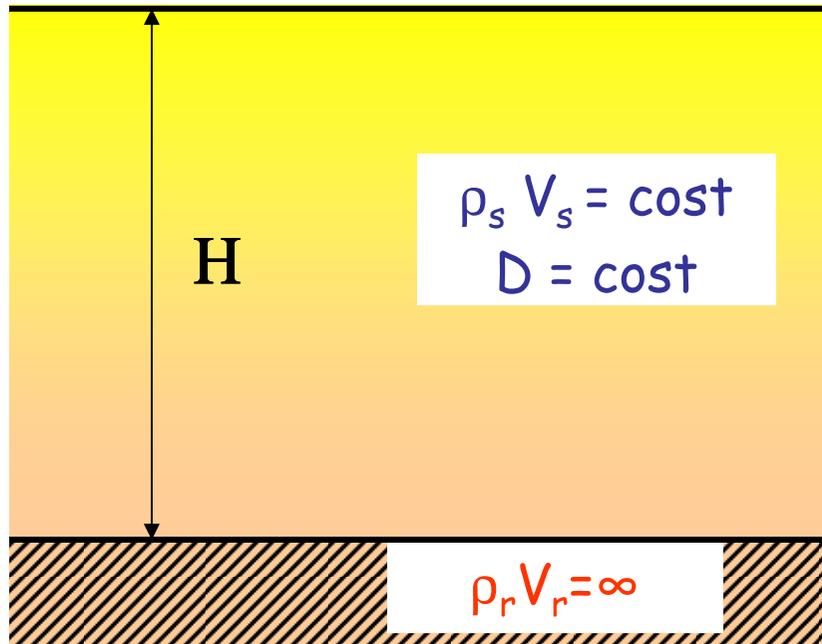
I valori massimi della funzione di amplificazione assumono valori finiti e sono pari proprio al rapporto di impedenza

I fenomeni di amplificazione sono tanto più marcati quanto maggiore è il contrasto di impedenza tra la roccia di base e quella del terreno sovrastante

**Strato omogeneo visco-elastico
su substrato rigido**

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido



Si introducono le proprietà dissipative del terreno attraverso un modello costitutivo di tipo visco-elastico lineare (mezzo alla Kelvin-Voigt)

Il parametro rappresentativo dei fenomeni di dissipazione per smorzamento interno è il **fattore di smorzamento D**

Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido

Funzione di amplificazione $A_{r,v}$

$$A_{r,v}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 F + (DF)^2}}$$

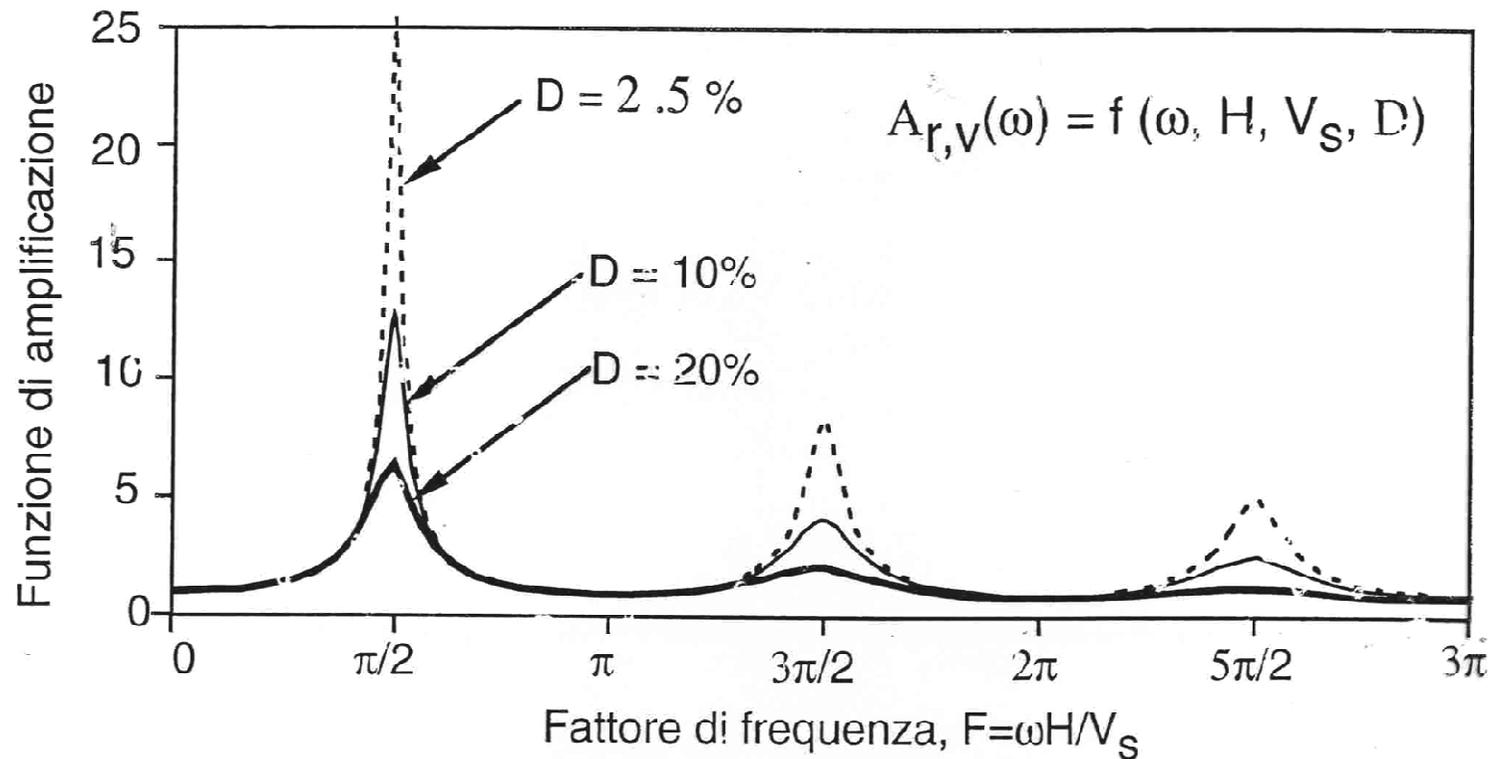
$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$

Fattore di frequenza

D

Fattore di smorzamento

Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido



- le frequenze naturali restano sostanzialmente invariate
- la funzione di amplificazione presenta valori massimi finiti che si riducono all'aumentare di F (fenomeni di attenuazione alle alte frequenze)
- valore massimo di $A_{r,v}(\omega)$ si verifica in corrispondenza della frequenza naturale minore

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido

La prima frequenza naturale è detta **frequenza fondamentale del deposito f_0** :

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{2\pi H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right) \quad \text{con } n = 0 \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{V_s}{4H}$$

cui è associato il **periodo fondamentale T_0** $T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{4H}{V_s}$

Il valore massimo della funzione di amplificazione è pari

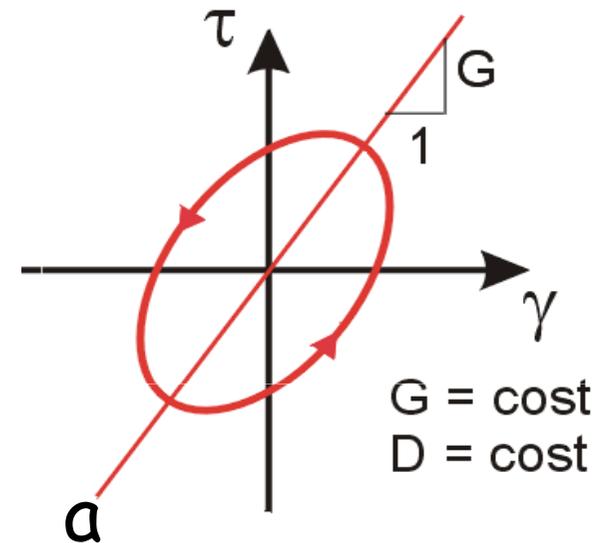
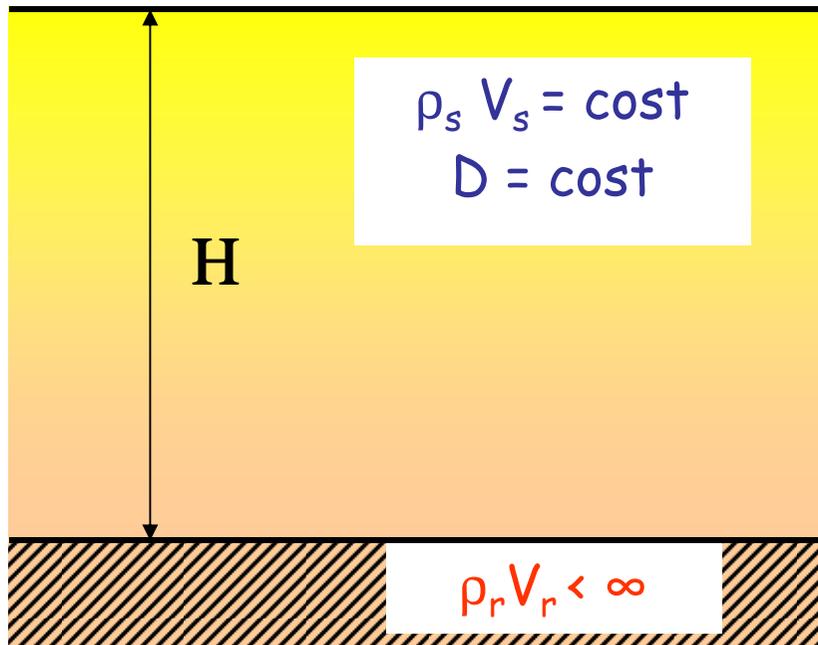
$$A_r(\omega_0) = \frac{2}{\pi D}$$

L'amplificazione è tanto minore quanto maggiore è lo smorzamento del terreno D

**Strato omogeneo visco-elastico
su substrato deformabile**

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Strato omogeneo visco-elastico su substrato deformabile



Generalizzazione di tutti i problemi trattati in precedenza

Strato omogeneo visco-elastico su substrato deformabile

La funzione di amplificazione non può essere espressa in forma semplice; il valore di picco si ottiene in corrispondenza della frequenza fondamentale f_0 e vale:

$$A_{d,v}(f_0) = \frac{I}{1 + 0,5\pi D I}$$

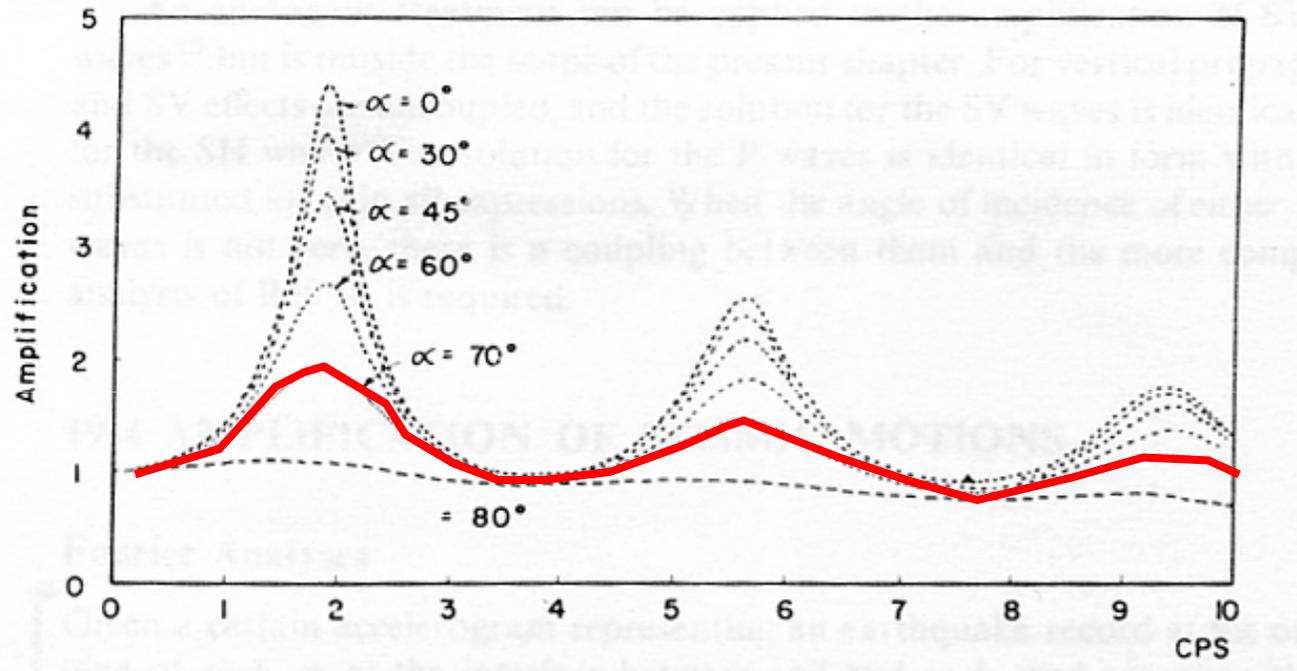
L'amplificazione massima cresce

- al crescere del rapporto di impedenza I
- al decrescere del fattore di smorzamento D del terreno

$$A_{d,v}(f_0) \leq 10$$

Influenza dell'angolo di incidenza

Funzioni di amplificazione calcolate per onde di taglio incidenti con diversi angoli α .

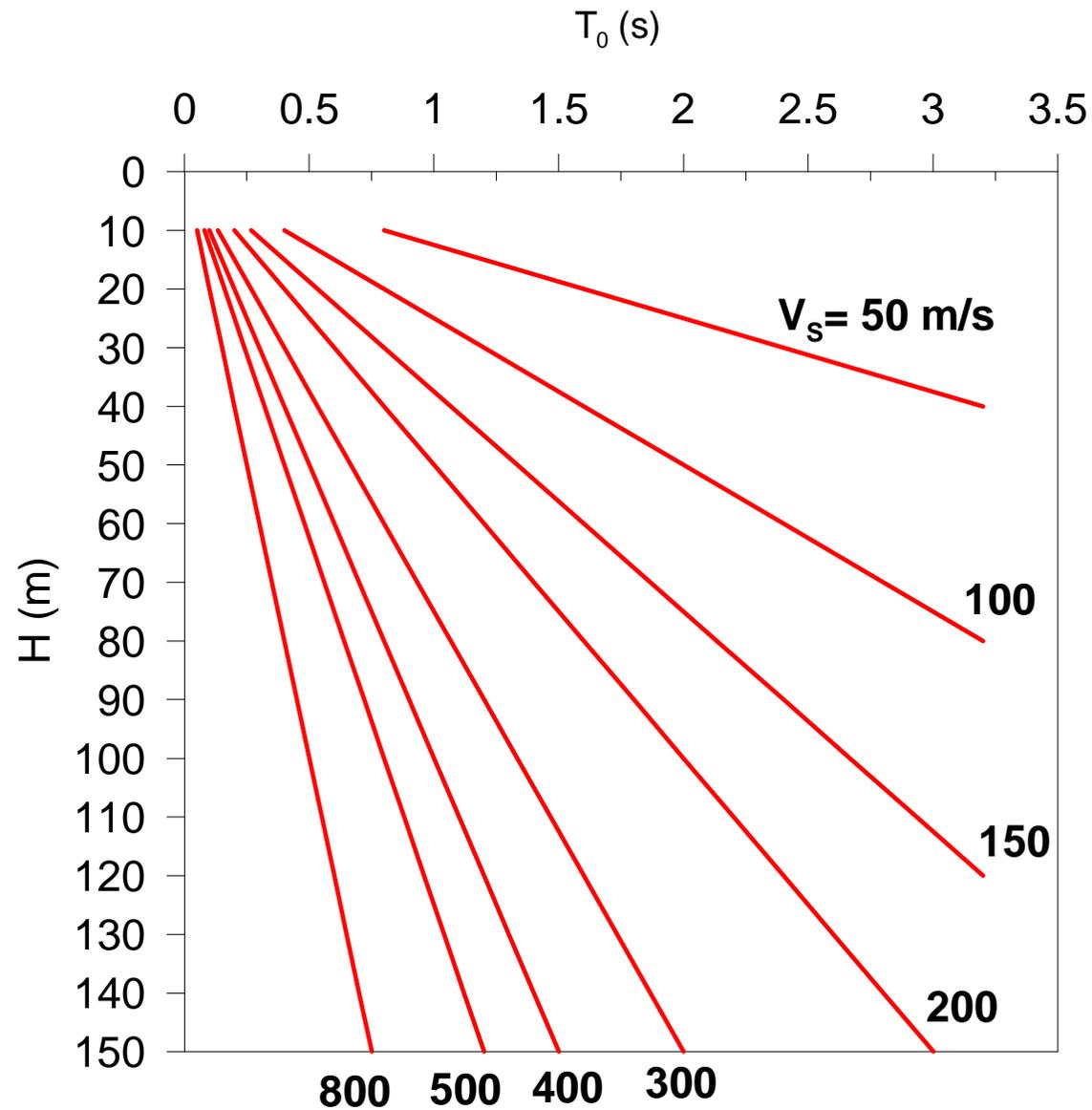


- la forma della funzione di amplificazione non è influenzata dall'angolo di incidenza α
- ampiezza dei picchi e importanza del primo picco si riduce al crescere dell'angolo di incidenza α

I fenomeni di amplificazione sono possibili in presenza di eventi sismici?

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Valori tipici del periodo fondamentale



$$T_0 = \frac{4H}{V_s}$$

$$f_0 = \frac{V_s}{4H}$$

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Valori tipici della frequenza fondamentale

V_s (m/s) H(m)	50	100	200	400	800
5	2,5	5,0	10,0	20,0	40,0
10	1,25	2,5	5,0	10,0	20,0
20	0,62	1,25	2,5	5,0	10,0
50	0,25	0,5	1,0	2,5	4,0
100	-	0,25	0,5	1,0	2,0
200	-	-	0,25	0,5	1,0
500	-	-	-	0,25	0,4

Risonanza : è possibile??

Range di frequenze fondamentali per i depositi naturali:

$$f_0 = 0.25 - 10 \text{ Hz}$$

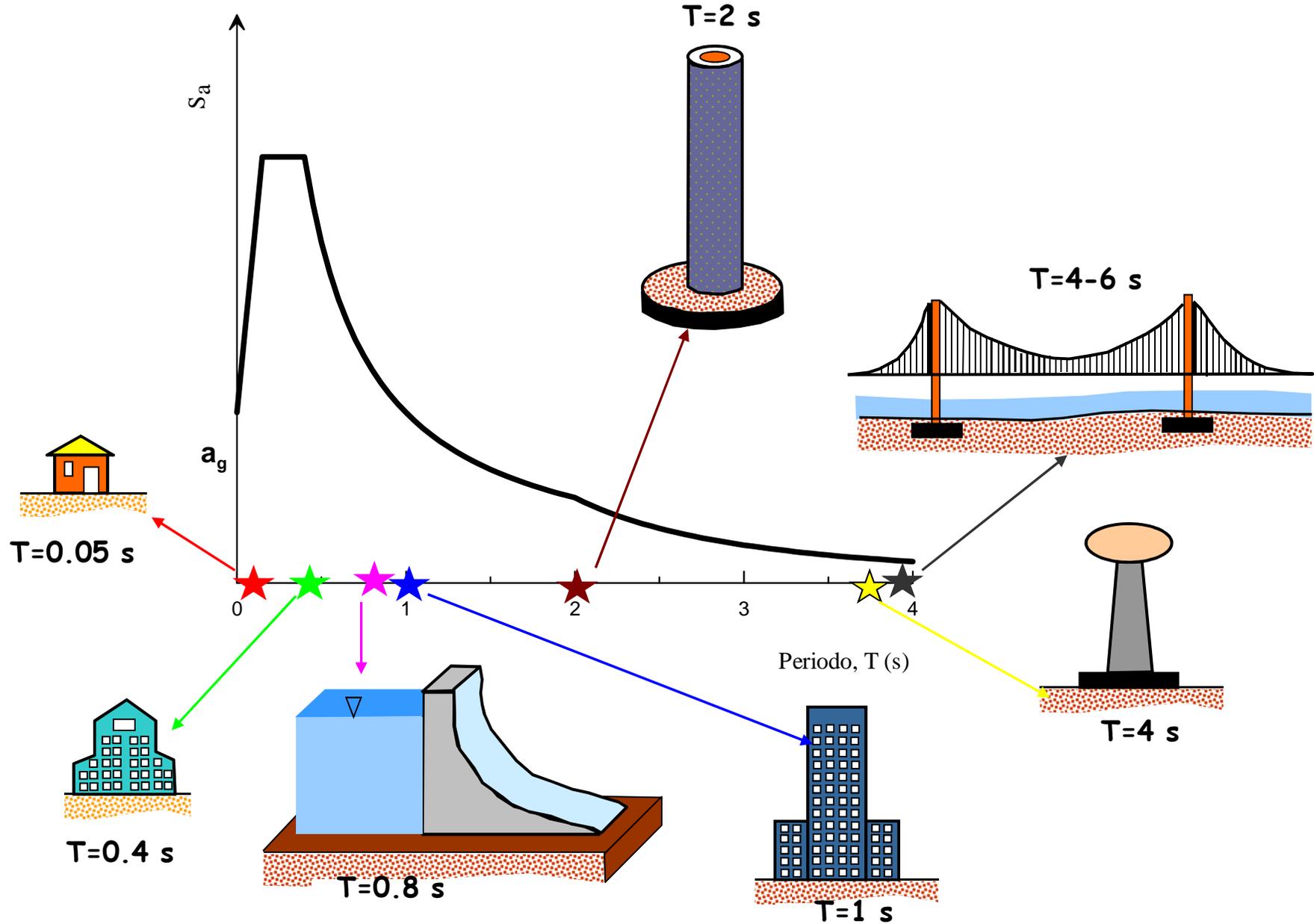
Range di frequenze predominanti per i terremoti:

$$f_p = 0.1 - 20 \text{ Hz}$$

Fenomeni di risonanza molto probabili

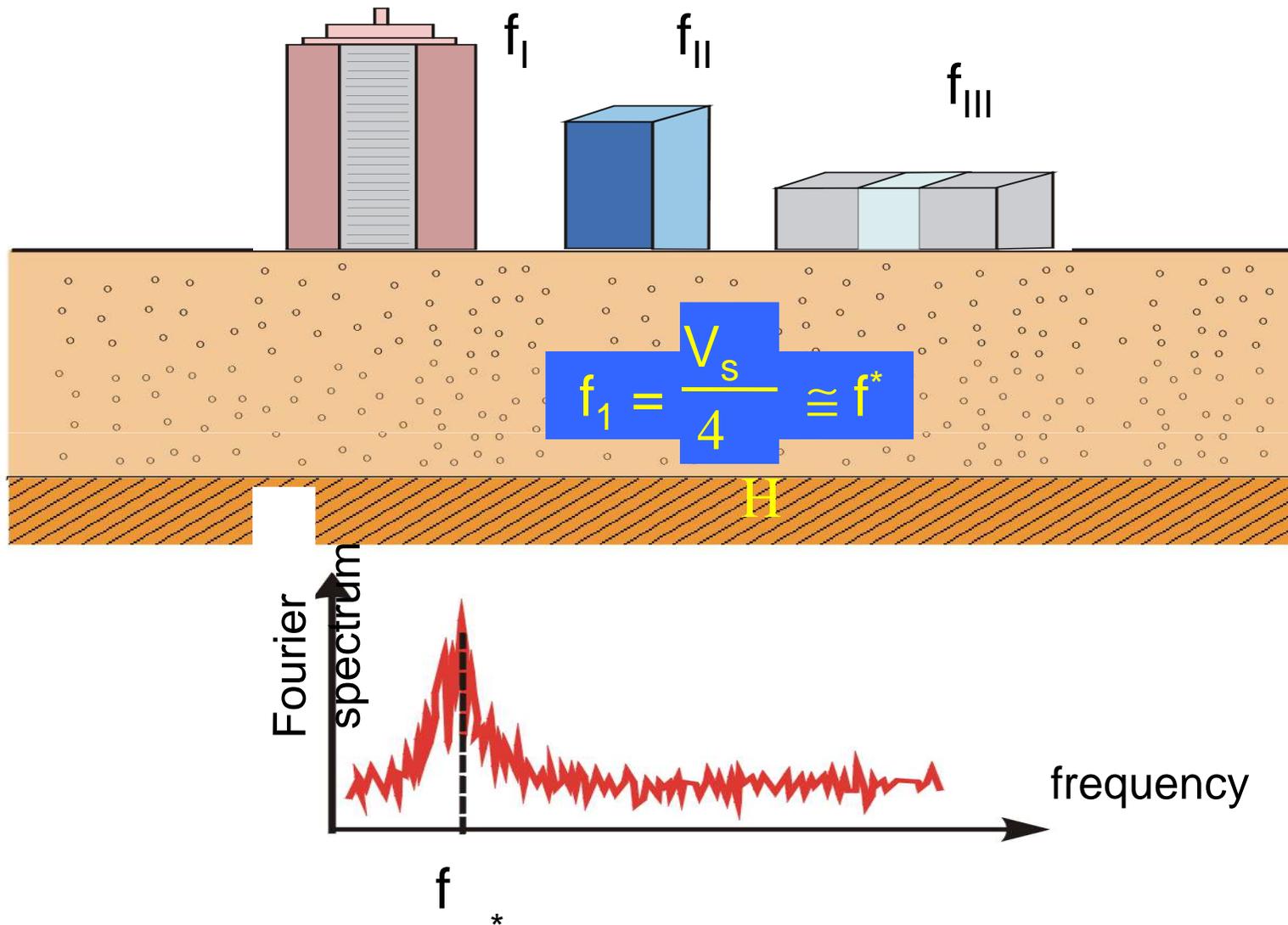
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Periodo fondamentale di diversi sistemi strutturali



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Doppia risonanza



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

Il terremoto di Città del Messico del 1985



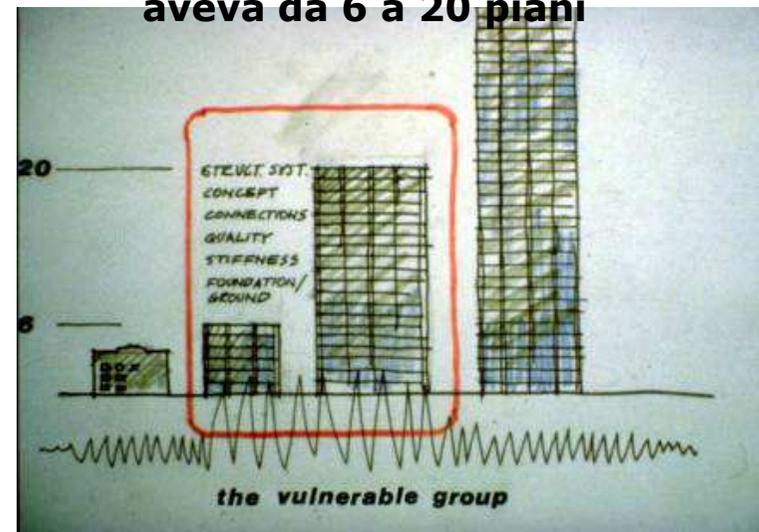
Edificio di 21 piani in struttura metallica



Il 60% circa degli edifici danneggiati aveva da 6 a 20 piani

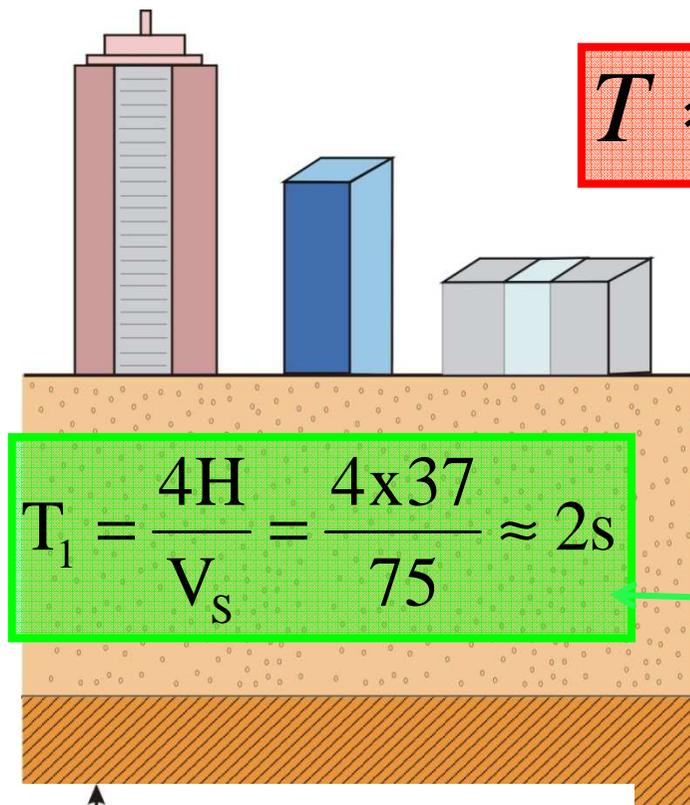
Bilancio:
- 9000 vittime
- 5000 edifici danneggiati
- 500 edifici crollati

Come si giustifica la particolare distribuzione dei danni osservati tra le diverse tipologie costruttive?



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

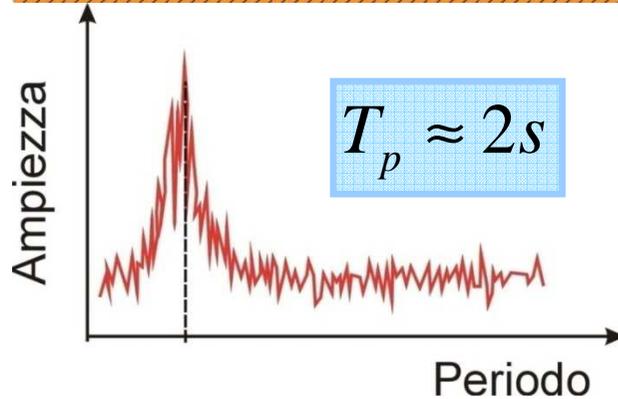
Il terremoto di Città del Messico del 1985



$$T \approx 2s$$

$$T_1 = \frac{4H}{V_s} = \frac{4 \times 37}{75} \approx 2s$$

$$T_p \approx 2s$$



Coincidenza tra :
**periodo di vibrazione
della struttura**

**periodo fondamentale del
sito T_1**

**periodo predominante
dell'input sismico T_p**

Il terremoto di Città del Messico del 1985

Fenomeno di doppia risonanza



RSL di un sottosuolo ideale: considerazioni riassuntive

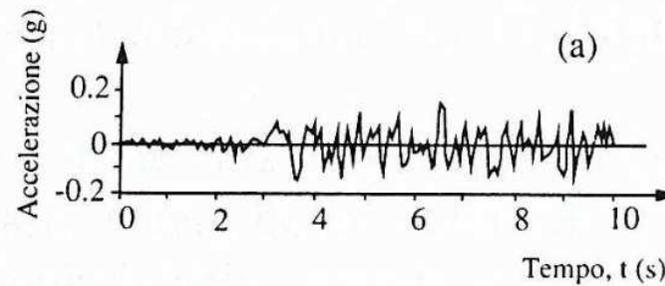
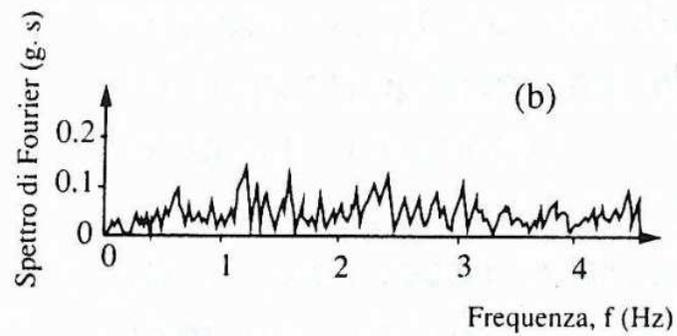
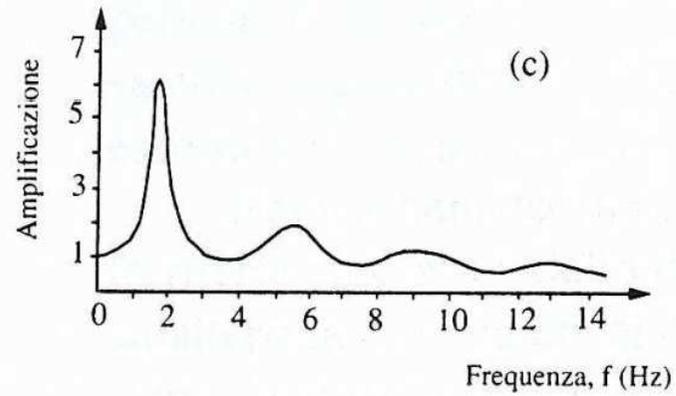
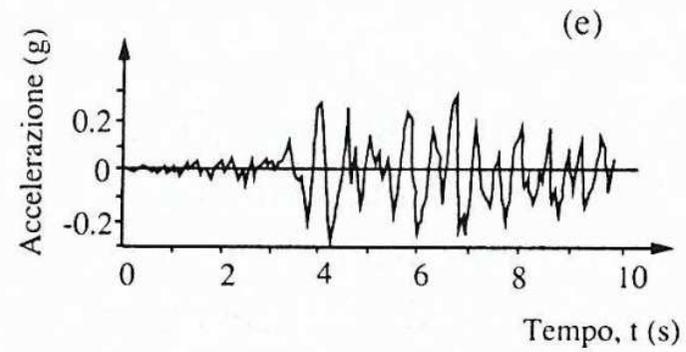
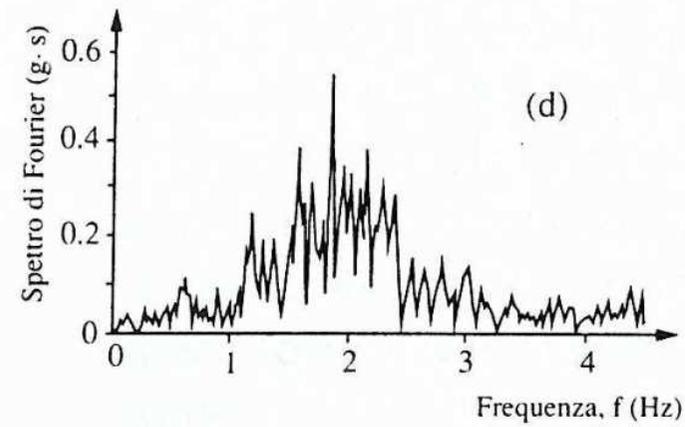
Fenomeni fisici responsabili dell'amplificazione

- “imprigionamento” delle onde sismiche dovuto al contrasto di impedenza tra rocce e terreni sovrastanti
- risonanza che si verifica se la frequenza predominante dell'input sismico è prossima alla frequenza fondamentale di vibrazione del deposito

L'entità dell'amplificazione e quindi l'ampiezza del moto in superficie è governata dal rapporto di impedenza roccia-terreno e dal fattore di smorzamento del terreno; in particolare l'amplificazione cresce:

- al crescere del rapporto di impedenza
- al diminuire del fattore di smorzamento del terreno

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI



RSL di un sottosuolo REALE

Modello 1D della RSL

RSL di un sottosuolo reale

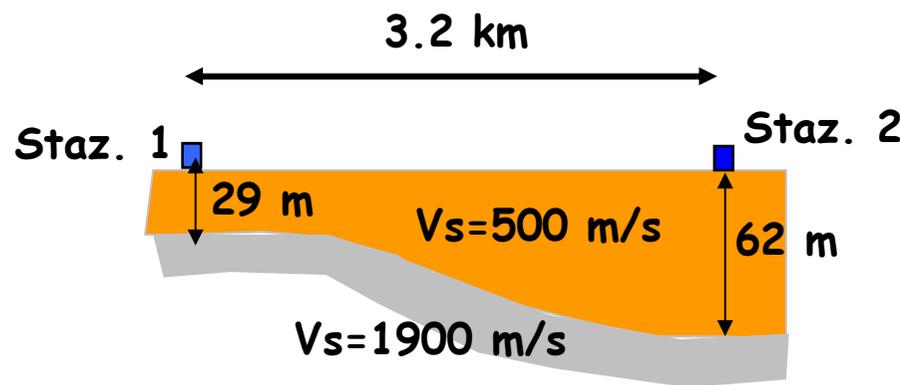
Per la valutazione della risposta sismica locale di un sottosuolo reale è necessario tenere conto :

- **variazione con la profondità dei parametri di rigidità e smorzamento** dovuto all'eterogeneità dei terreni costituenti il sottosuolo e alla dipendenza di tali parametri dallo stato tensionale
- **comportamento meccanico dei terreni** che si presenta fortemente non lineare e dissipativo a partire da deformazioni molto piccole
- **configurazione morfologica** del contatto basamento-deposito e della topografia (effetti 2D-3D)
- adeguata caratterizzazione dell'**input sismico** (ampiezza, durata e contenuto in frequenza)

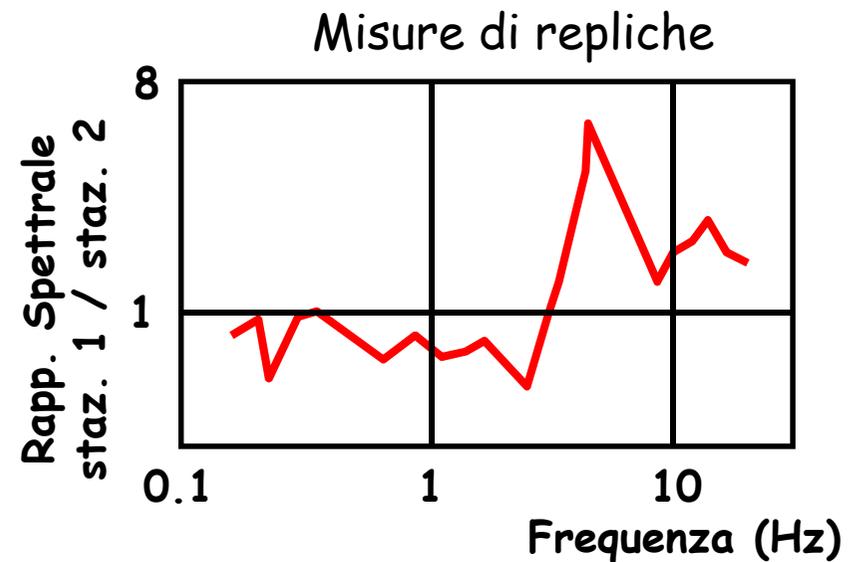
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: influenza dello spessore

$$f_n = \frac{V_s (2n + 1)}{4H}$$



(Hays, 1980)

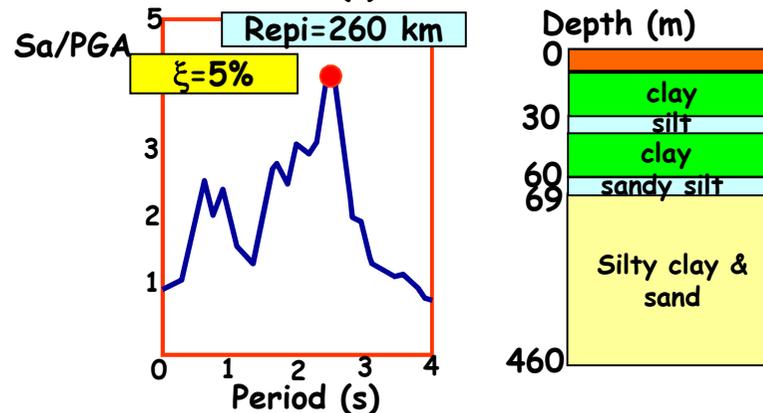
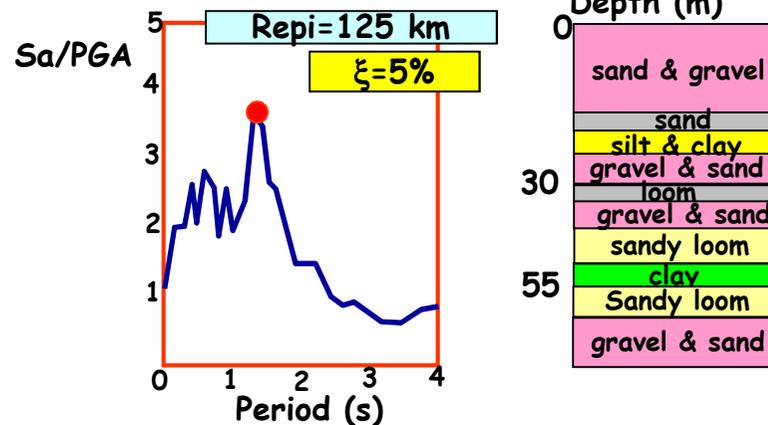
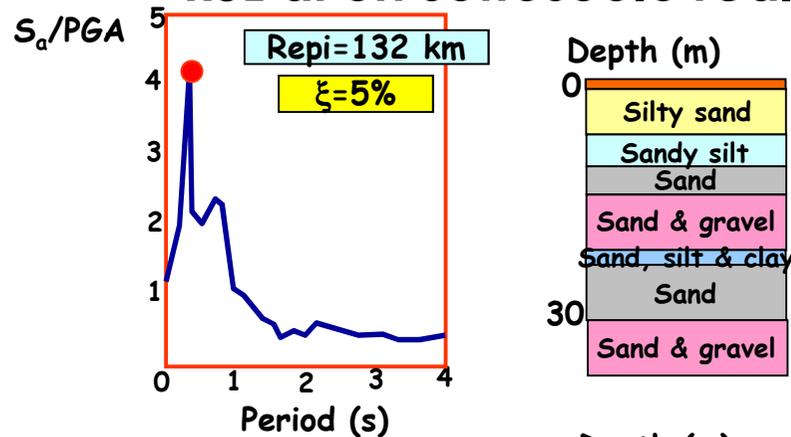


- Strati di **spessore modesto** amplificano ad **alte frequenze**
- Strati di **grande spessore** ($H > 30-40$ m) amplificano a **basse frequenze**

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: influenza della deformabilità

EQ 27/03/1963 - M=6.9



deformabilità

$$f_n = \frac{V_s(2n+1)}{4H}$$

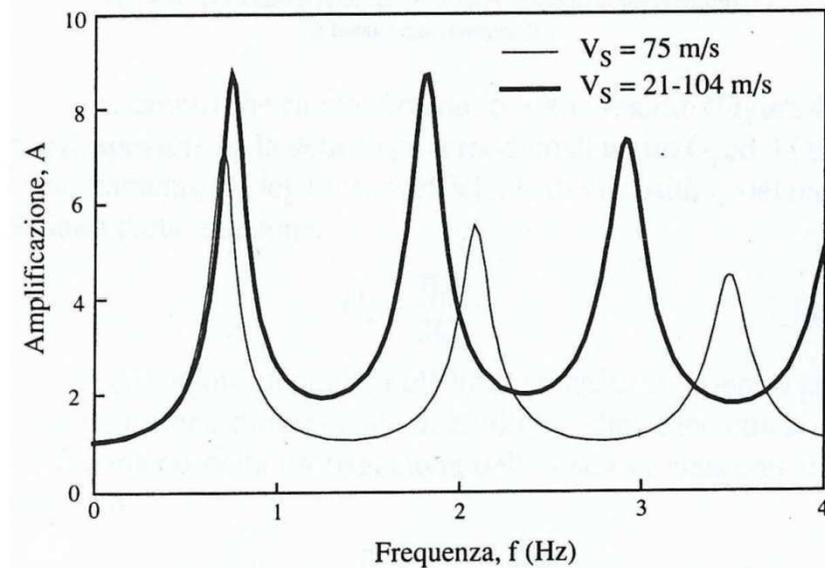
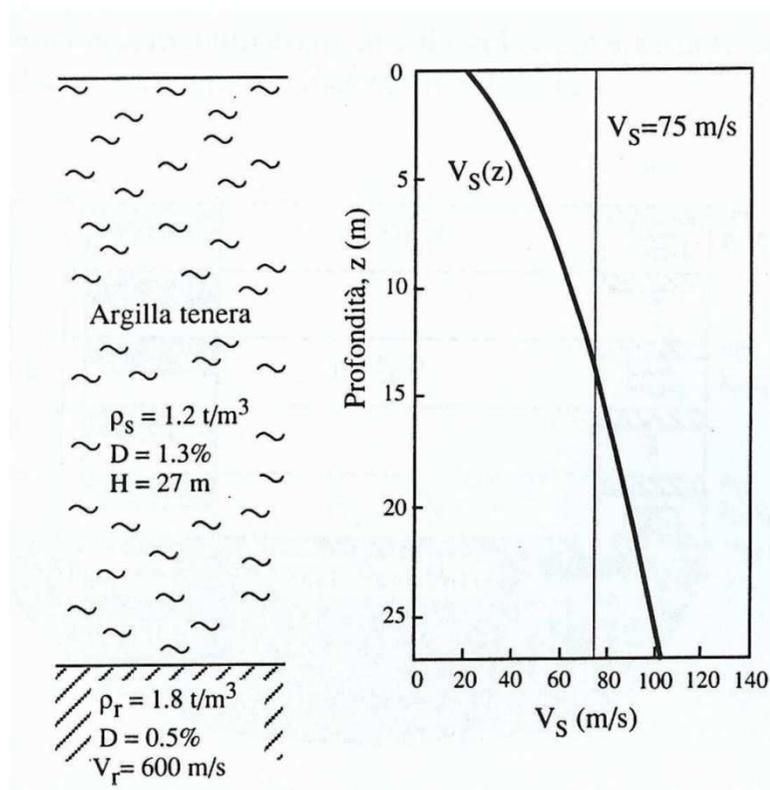
$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{4H}{V_s(2n+1)}$$

Gli strati più deformabili (V_s si riduce) esaltano le basse frequenze

(Seed & Idriss, 1969)

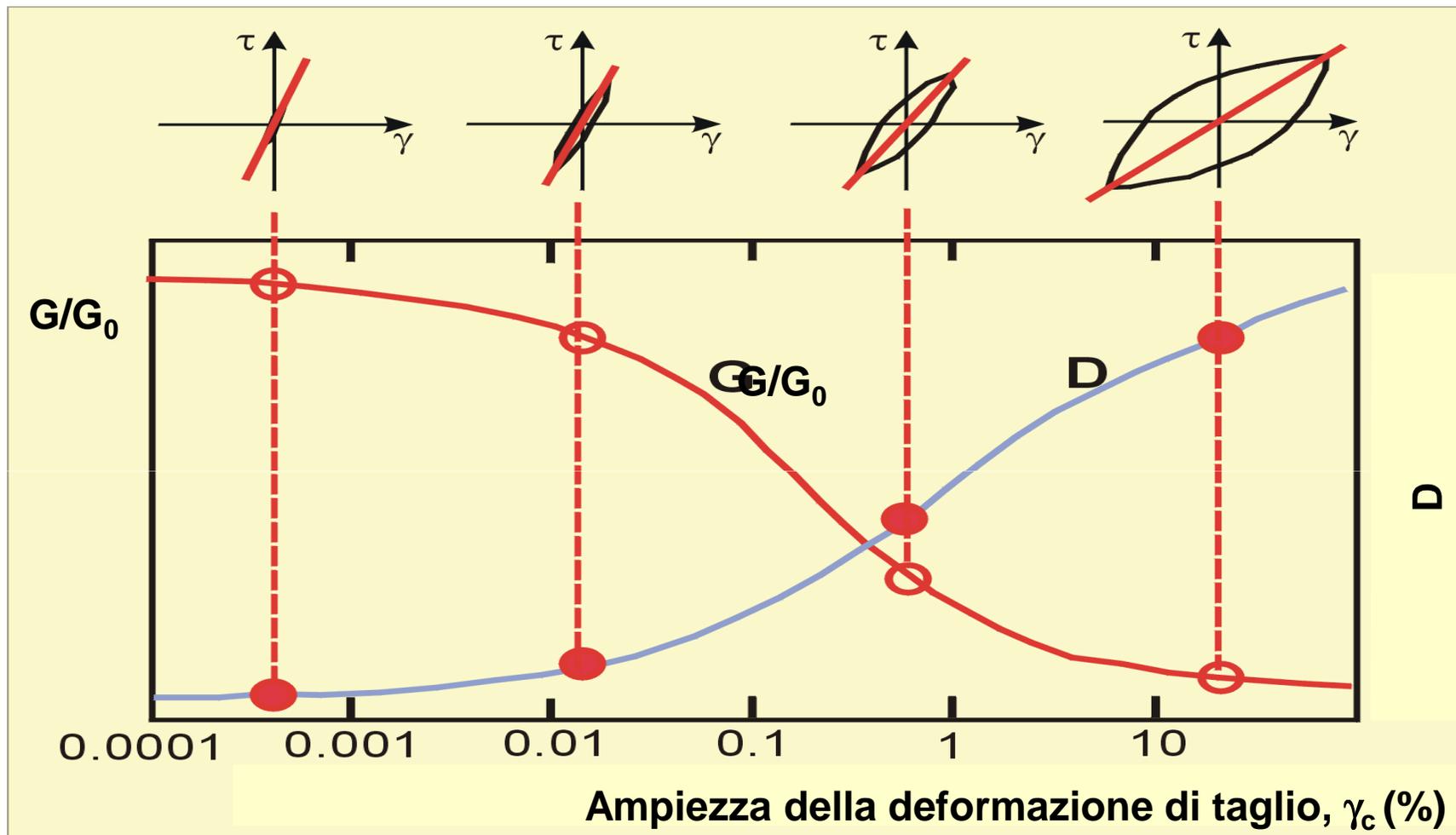
RSL di un sottosuolo reale: eterogeneità

Città del Messico



A parità di valori medi, una variazione continua di V_S con z comporta **avvicinamento delle frequenze naturali**

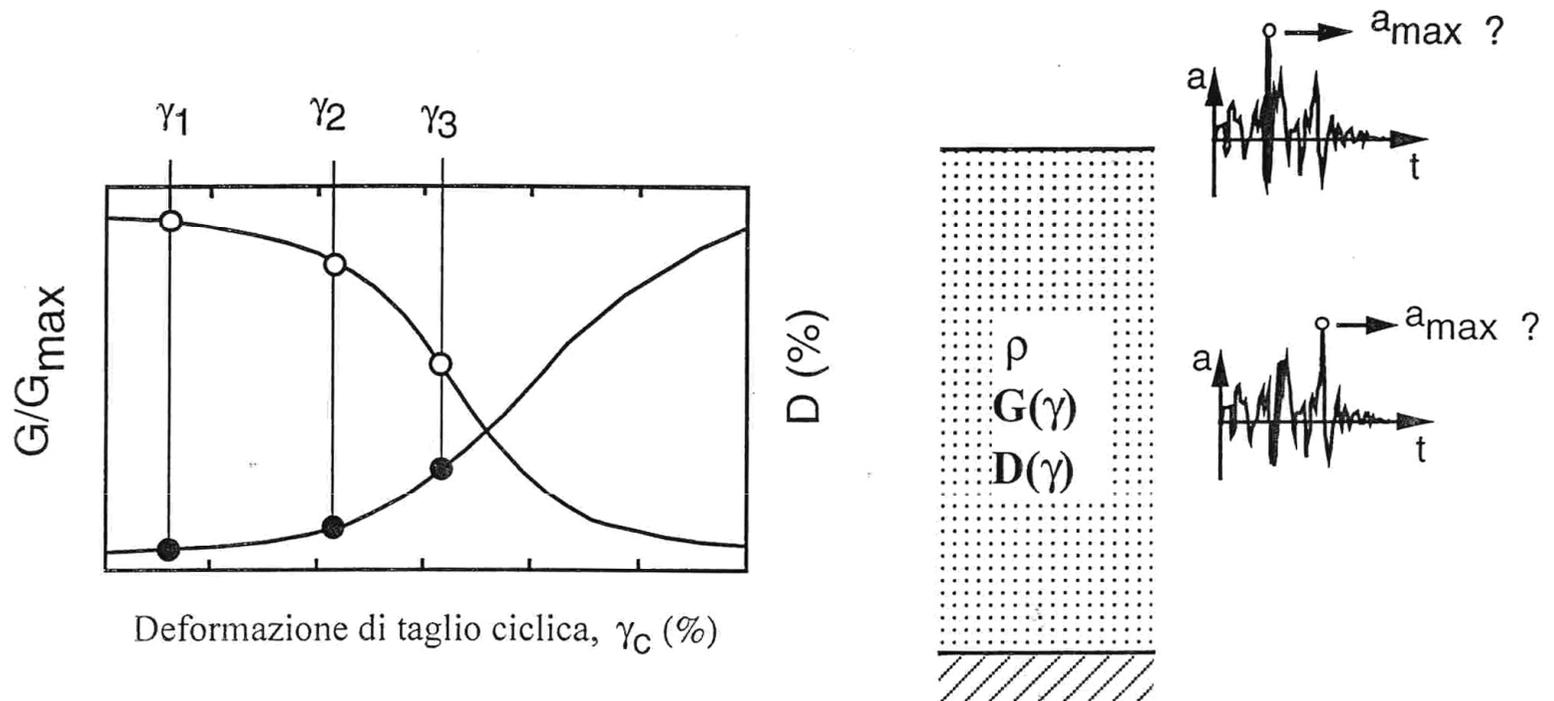
RSL di un sottosuolo reale: non linearità



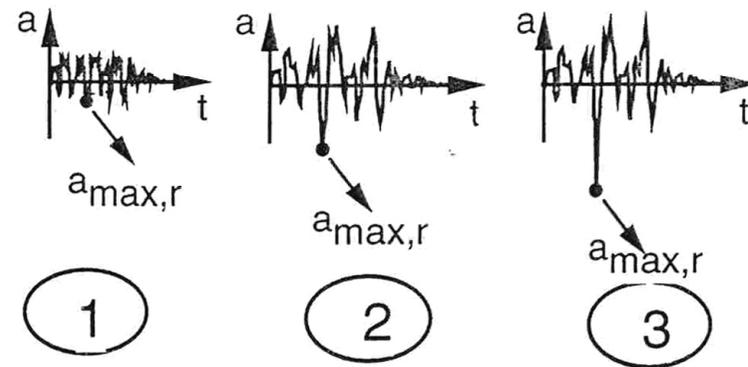
Al crescere dell'intensità dell'input sismico e quindi di γ , il modulo di taglio G si riduce e il fattore di smorzamento D aumenta

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: influenza della non linearità su a_{\max}

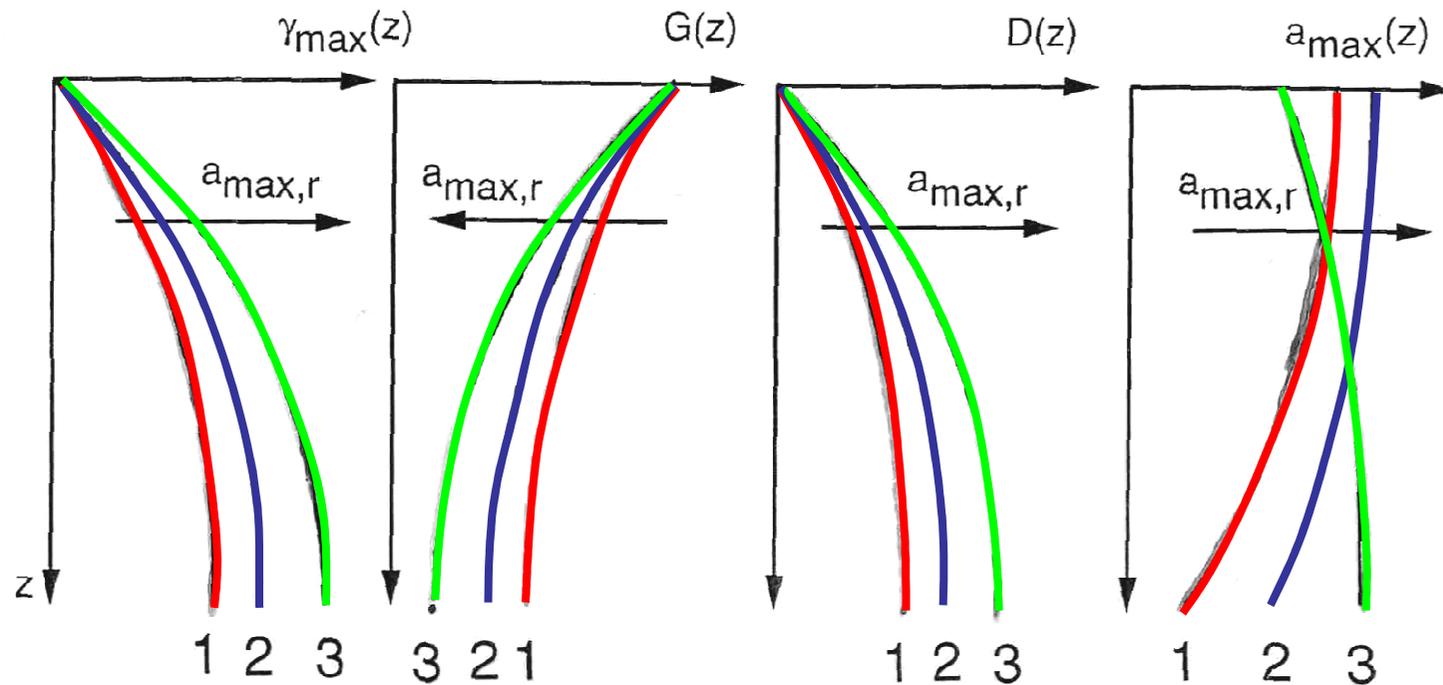


Input sismico al bedrock caratterizzato da valori crescenti dell'accelerazione di picco $a_{\max,r}$



RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: influenza della non linearità su a_{\max}

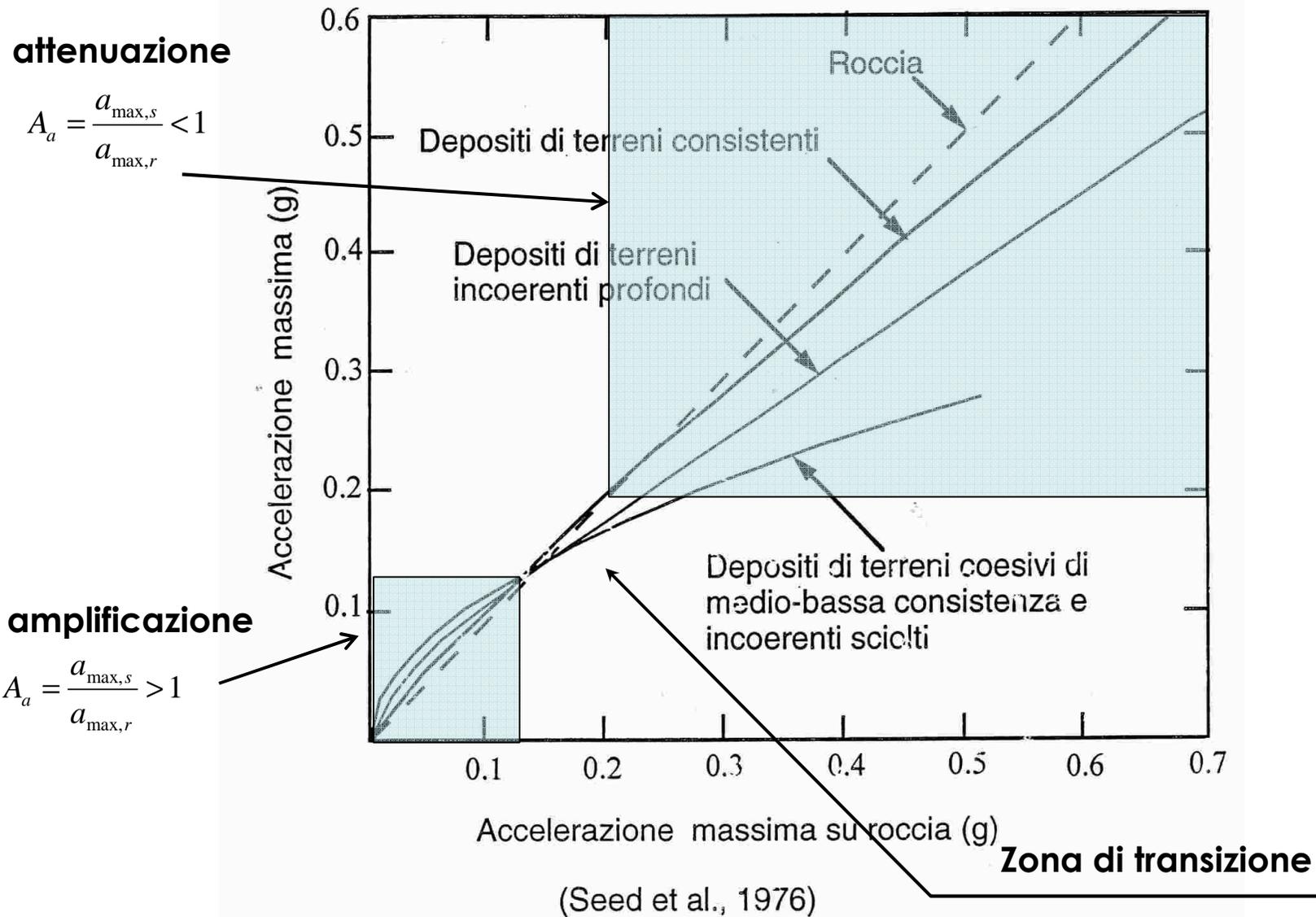


Al crescere dell'accelerazione su roccia $a_{\max,r}$

- aumentano le γ_{\max} e conseguentemente si verifica una riduzione di G e un aumento di D
- per bassi livelli di energia (curve 1 e 2) l'accelerazione aumenta dal basamento alla superficie
- per elevati livelli di energia (curva 3) l'accelerazione può invece diminuire lungo il profilo

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

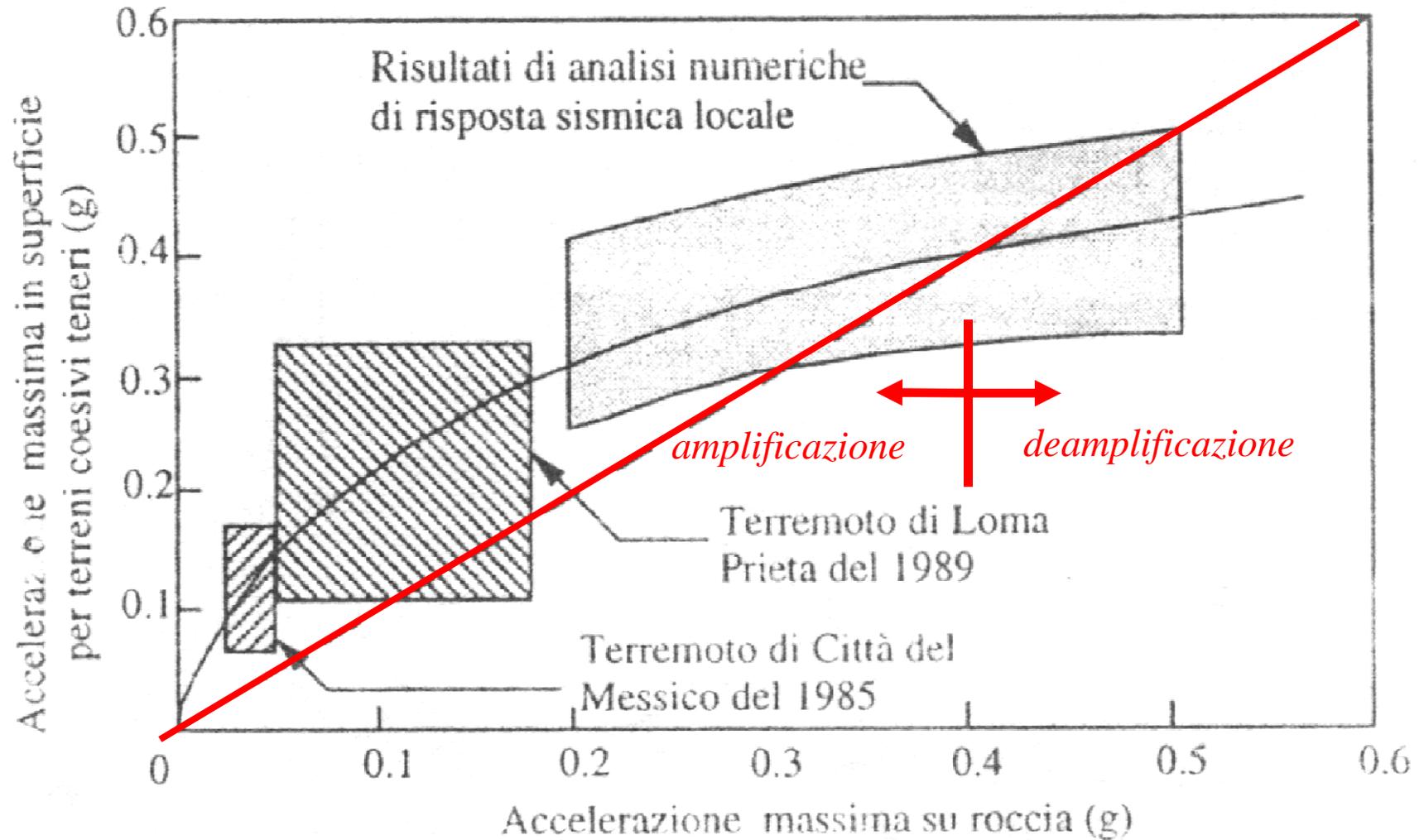
RSL di un sottosuolo reale: influenza della non linearità su a_{\max}



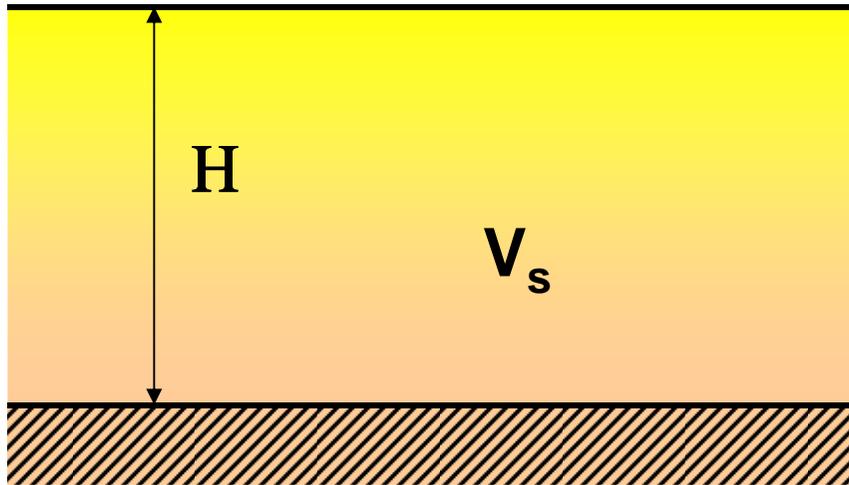
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: influenza della non linearità su a_{\max}

Terreni coesivi teneri



RSL di un sottosuolo reale: influenza della non linearità sulla funzione di amplificazione



$$f_0 = \frac{V_s}{4H}$$

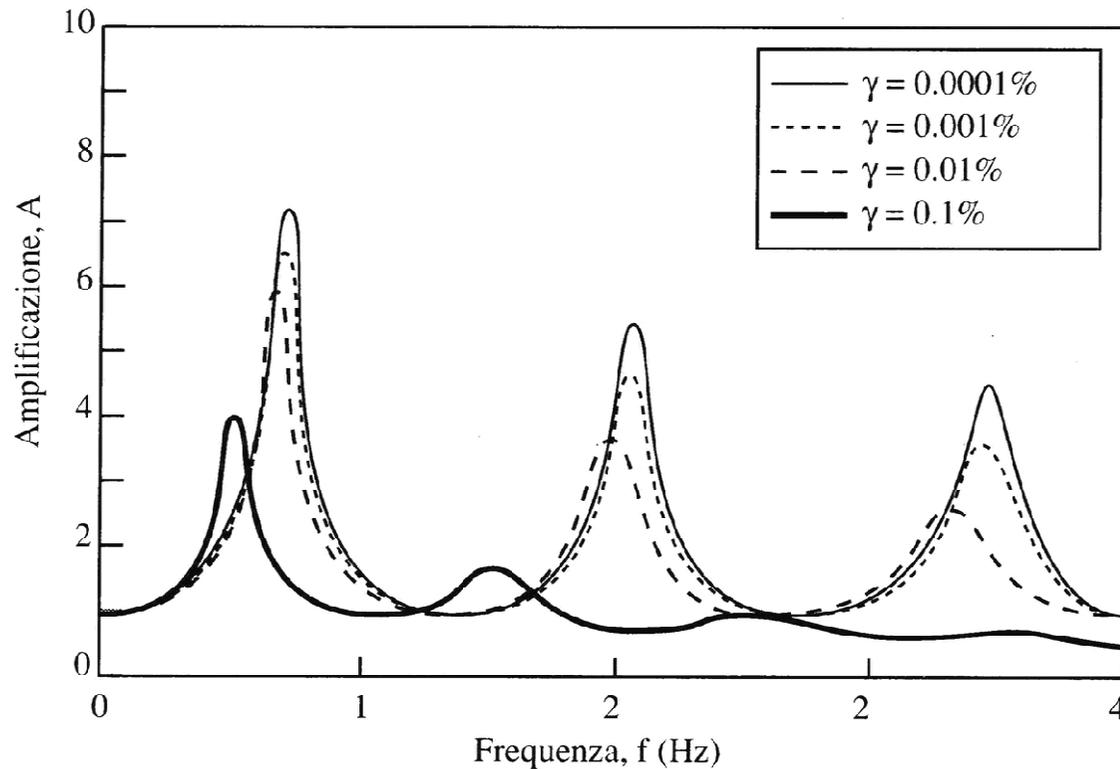
$$A_{d,v}(f_0) = \frac{I}{1 + \pi D I / 2}$$

Al crescere dell'intensità del moto sismico:

- la frequenza fondamentale di vibrazione dello strato f_0 si riduce a causa della riduzione del modulo di taglio G
- il valore di picco della funzione di amplificazione si riduce a causa dell'aumento del fattore di smorzamento D

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: influenza della non linearità sulla funzione di amplificazione



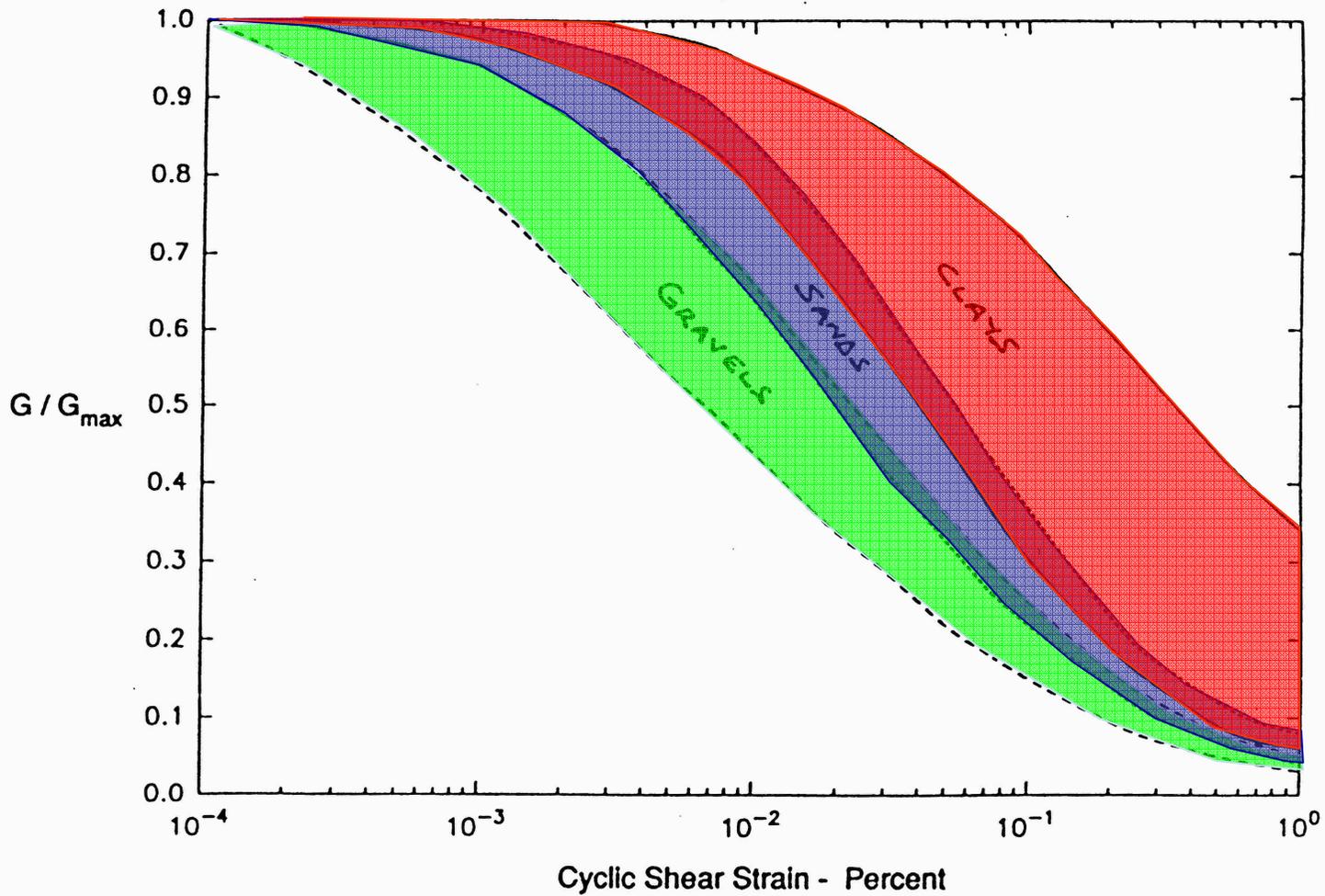
$$f_0 = \frac{V_S}{4H}$$

$$A_{d,v}(f_0) = \frac{I}{1 + \pi D I / 2}$$

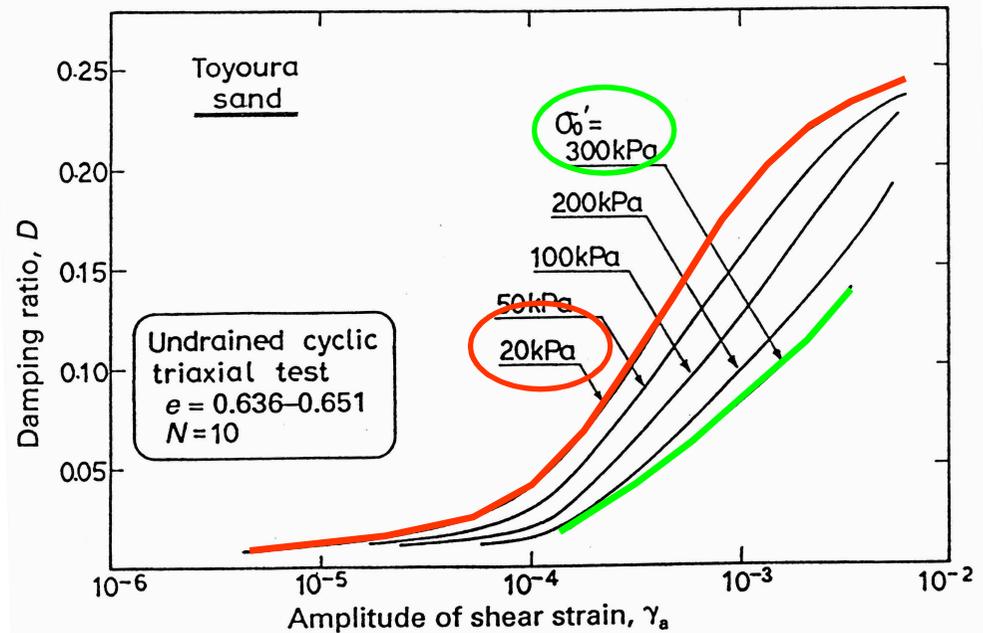
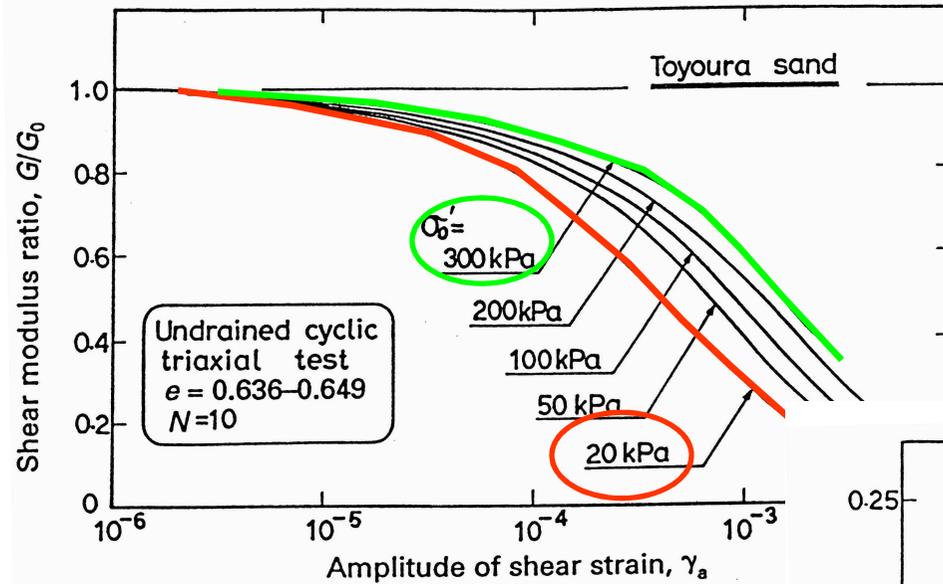
Al crescere dell'intensità del moto sismico i picchi della funzione di amplificazione si riducono e si spostano verso frequenze minori

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$

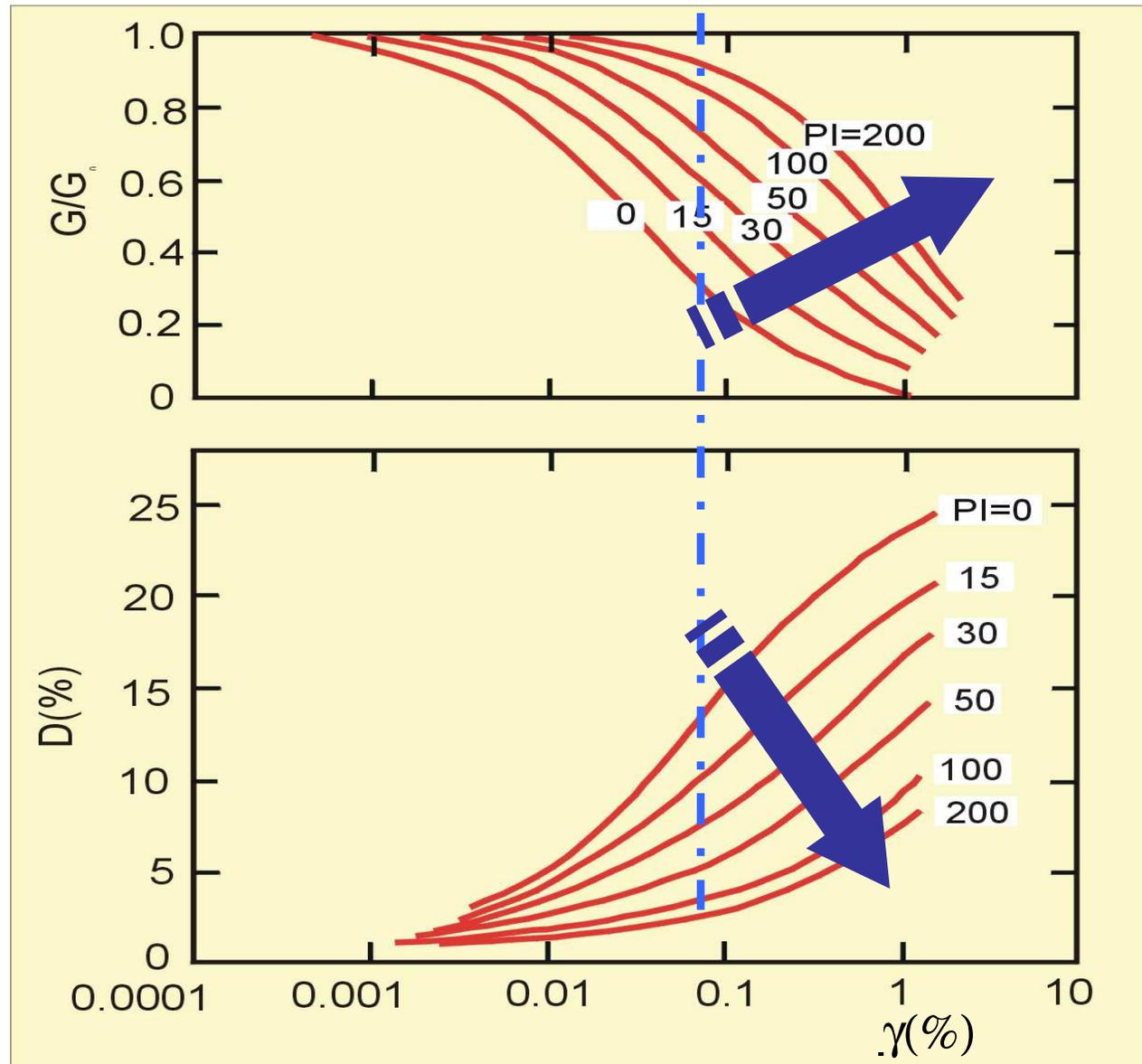


RSL di un sottosuolo reale: curve G/G_0 - γ e D - γ



(Kokusho, 1980)

RSL di un sottosuolo reale: curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$



(Vucetic & Dobry,
1991)

RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: proprietà dinamiche dei terreni

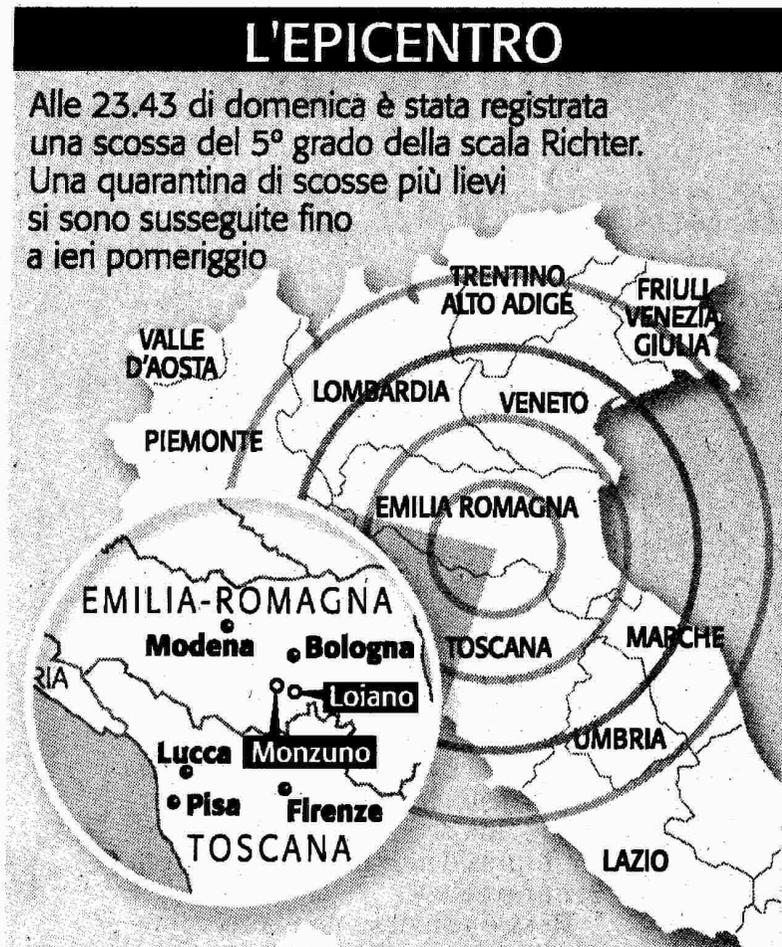


21255 Nel catastrofico terremoto che colpì Città di Messico nel 1957, rimase indenne il più alto edificio della metropoli, la «Torre Latino-Americana», perché le sue fondamenta erano state gettate su un terreno paludoso, che dunque smorzò le vibrazioni.



ne siamo proprio sicuri?

RSL di un sottosuolo reale: proprietà dinamiche dei terreni



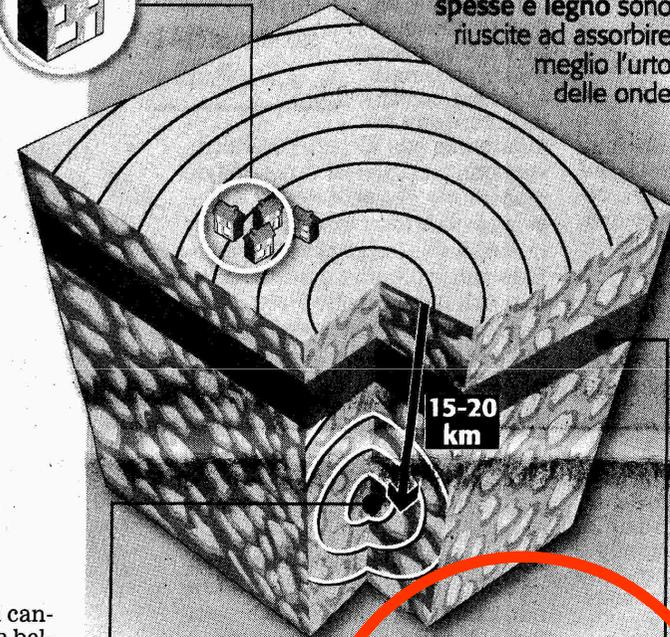
ne siamo proprio sicuri?

...e sta sc...
...li entità...
...ti, sono

Perché i danni sono stati limitati

CASE IN PIETRA

Le case basse costruite in campagna con pietre spesse e legno sono riuscite ad assorbire meglio l'urto delle onde



nel can-
ma bel-
ed era

PROFONDITÀ

La profondità focale dell'ipocentro è stata di 15-20 chilometri dentro la crosta terrestre. L'onda sismica ha avuto più spazio per smaltire l'effetto devastante

TERRENO ARGILLOSO

Il terreno morbido e argilloso tipico dell'Appennino toscano-emiliano ha facilitato l'assorbimento delle onde riducendo gli effetti in superficie

...la sal-
Non ha
ico del-
oti: «Se
e zone
sempio
ro ret-
ticular-
mmor-
profon-

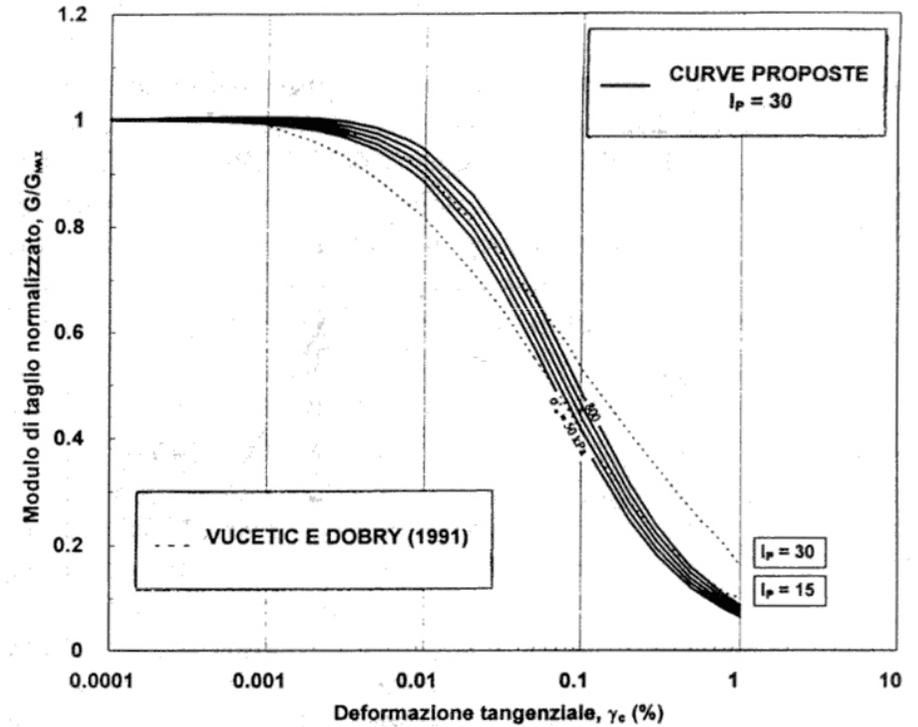
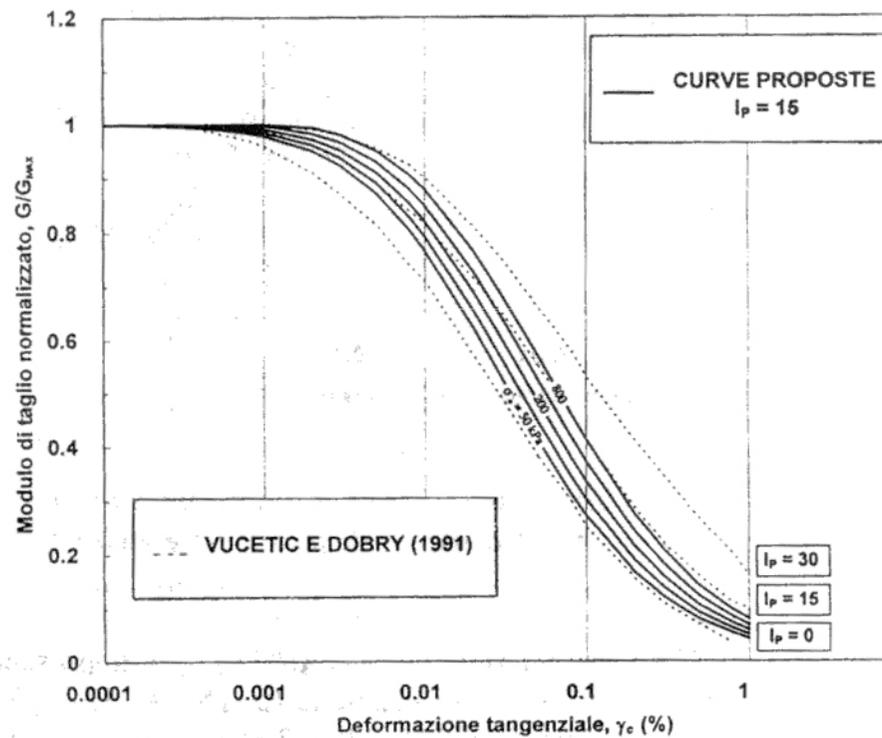
RSL di un sottosuolo reale: curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$

- Seed et al. (1986)
- Ishibashi e Zhang (1993)
- EPRI (1993)
- Lanzo (1999)
- Darendeli (2001)

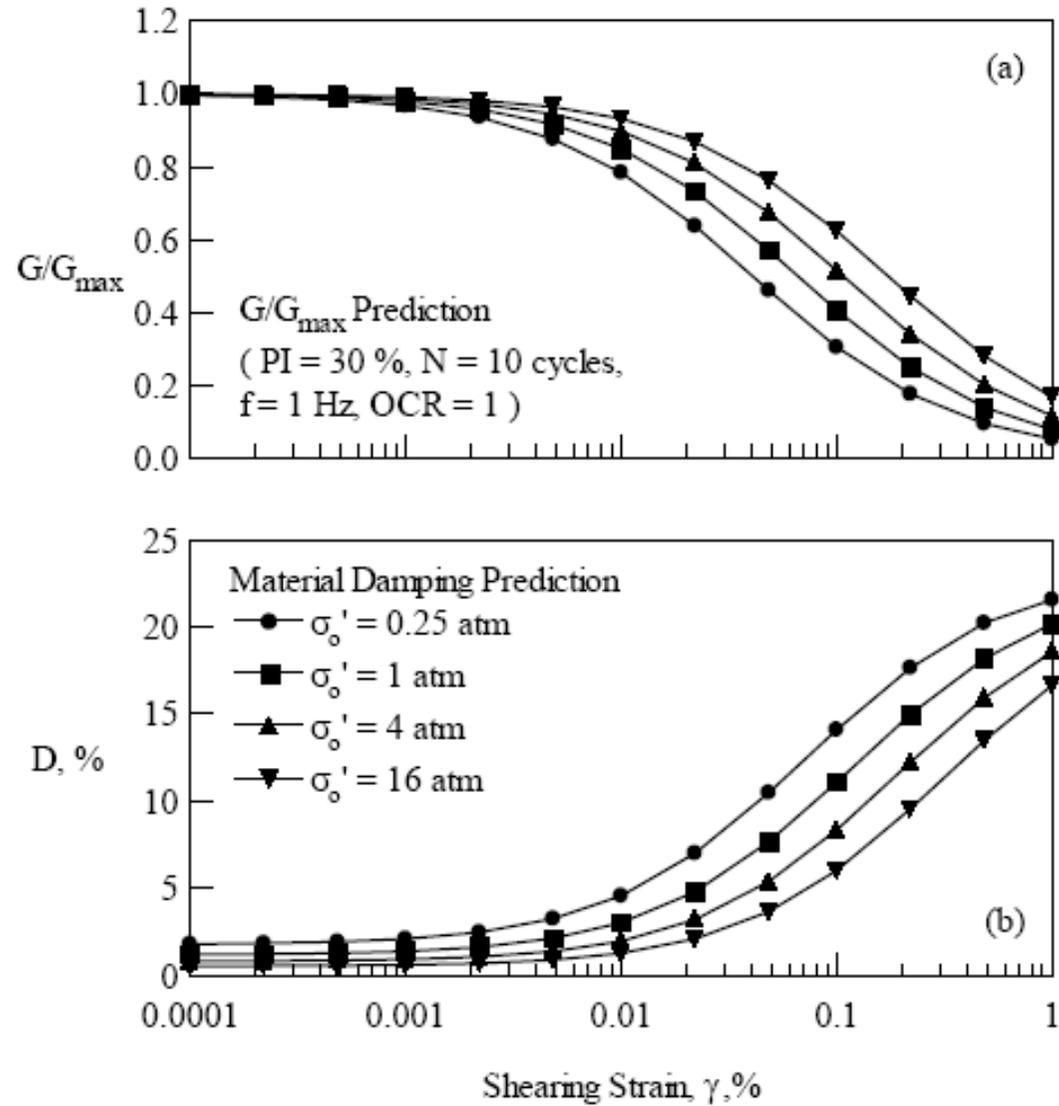
RISPOSTA SISMICA LOCALE: FONDAMENTI TEORICI

RSL di un sottosuolo reale: curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$

Lanzo (1995)



RSL di un sottosuolo reale: curve G/G_0 - γ e D - γ



Darendeli (2001)

**Effetti stratigrafici (1D)
e normativa (NTC-08)**

3. Valutazione dell'azione sismica con effetti locali

3.2.2 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Categorie di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel § 7.11.3.

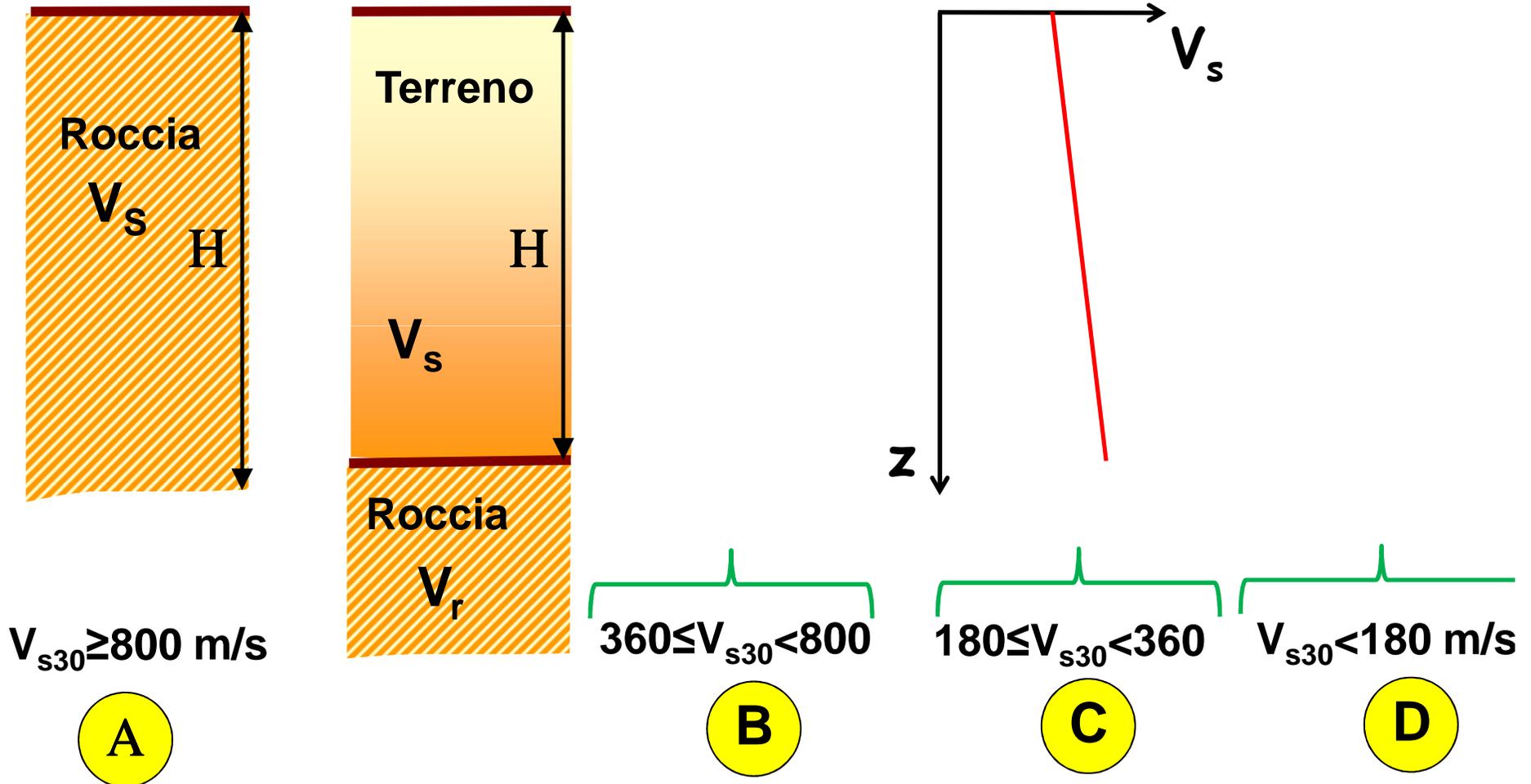
In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

Azione sismica e RSL nelle NTC-08: effetti stratigrafici

- A** Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
- B** Depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
- C** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
- D** Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
- E** Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Azione sismica e RSL nelle NTC-08: effetti stratigrafici

Per le classi di sottosuolo da A ad E si calcola il $V_{s,30}$



Riferimenti bibliografici

Darendeli M. B. (2001). Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 362 pp.

Ishibashi I., Zhang X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. Soils and Foundations, Vol. 33, No. 1, 182-191

Kokusho T. (1980) - Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol 20, 45-60

Lanzo G. (1995). Comportamento non lineare del terreno influente sulla risposta sismica locale. Tesi di Dottorato in Ingegneria Geotecnica. Consorzio tra le Università di Roma "La Sapienza" e di Napoli "Federico II", Università di Roma "La Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Roma, Febbraio 1995.

Lanzo G., Silvestri F. (1999). Risposta Sismica Locale. Teoria ed esperienze. Hevelius Edizioni. Marzo 1999.

Riferimenti bibliografici

Seed H.B., Idriss I.M. (1969). Influence of soil conditions on ground motion during earthquakes. Journal of Soil Mech. and Found., ASCE, Vol. 95, No. SM1, 99-137

Seed H.B., Ugas C., Lysmer J. (1976). Site-dependent spectra for earthquake-resistant design. Bulletin of Seismological Society of America, vol. 66, No. 1, 221-243

Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu, K. (1986) - Moduli and Dynamic Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 11, 1016-1032

Vucetic M., Dobry R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response, Journal of Geotech. Eng., ASCE, vol. 117, pp. 89-107, 1991.